

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní



Diplomová práce

Liberec 2014

Bc. Milan Špráchal

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Textilie vhodné pro ovládání dotykových displejů

Textiles suitable for touch screen control

Diplomová práce

Studijní program: N3106 - Textilní inženýrství

Studijní obor: 3106T018 - Netkané a nanovláknenné
materiály

Pracoviště: Katedra netkaných textilií a
nanovláknenných materiálů

Fakulta textilní

Technická univerzita v Liberci
Studentská 2, 416 17 Liberec

Autor: Bc. Milan Špráchal

Vedoucí: Ing. Ondřej Novák, Ph.D.
Katedra netkaných textilií a
nanovláknenných materiálů

Rozsah bakalářské práce: Počet stran: 65

Počet obrázků: 31

Originál zadání

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Ondřeji Novákovi Ph.D. za jeho ochotnou pomoc a cenné rady při realizaci této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu při studiu.

Anotace

Cílem této práce je seznámit se s principy dotykových technologií a provést rešerši na téma ovládání zařízení prostřednictvím dotykového displeje se zaměřením na principy použité u dotykových displejů. Následně vybrat parametry textilie na základě teoretických poznatků, získaných v rešerši, které ovlivňují jejich použitelnost při ovládání dotykových displejů a poté provést potřebná měření, která určí konkrétní hodnoty vybraných parametrů. Dalším cílem je navrhnout a realizovat měřicí zařízení, které vyhodnocuje vhodnost textilie pro konstrukci rukavic schopných ovládat dotykový displej. Závěrem této práce je praktické ověření funkčnosti navrženého měřicího zařízení pomocí získaných a připravených vzorků.

klíčová slova

ovládání dotykového displeje, kapacitní dotykový displej, vodivé textilie, dotykové rukavice

Abstract

The aim of this diploma thesis is to recognize principles of touchscreen technologies and do a research about controlling the device using touchscreen with focus on principles used in touchscreens. The next step is to choose parameters of the textile, based on the knowledge gained from the research, that affect their usability for controlling of touchscreens and then to perform necessary measurements, which will determine values of chosen parameters. Following aim is to design and realize a measuring device that will evaluate the suitability of the textile for creation of gloves capable to control the touchscreen. The last part of thesis experimentally tests the functionality of designed measuring device using obtained and prepared samples.

keywords

touch screen control, capacitive touch screen, conductive textiles, touch screen gloves

Obsah

PODĚKOVÁNÍ	5
ANOTACE	6
ABSTRACT	7
OBSAH.....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	13
ÚVOD	14
1 REŠERŠNÍ ČÁST	15
1.1 TECHNOLOGIE DOTYKOVÝCH DISPLEJŮ	15
1.1.1 ODPOROVÁ DOTYKOVÁ TECHNOLOGIE	16
1.1.2 KAPACITNÍ DOTYKOVÁ TECHNOLOGIE.....	18
1.1.3 INFRAČERVENÁ DOTYKOVÁ TECHNOLOGIE.....	19
1.1.4 AKUSTICKÁ DOTYKOVÁ TECHNOLOGIE.....	20
1.1.5 DALŠÍ TECHNOLOGIE	21
1.2 OVLÁDÁNÍ KAPACITNÍCH DISPLEJŮ.....	23
1.3 ELEKTRICKÝ ODPOR/VODIVOST	24
1.4 MĚŘENÍ POVRCHOVÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU/ VODIVOSTI	24
1.5 MĚŘENÍ OBJEMOVÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU/ VODIVOSTI.....	25
1.6 ELEKTRICKY VODIVÉ TEXTILIE.....	26

1.7 TLAK A MĚŘENÍ TLAKU	27
2 PRAKTICKÁ ČÁST	29
2.1 ZJIŠŤOVÁNÍ REFERENČNÍCH HODNOT	29
2.1.1 MINIMÁLNÍ OVLÁDACÍ SÍLA.....	30
2.1.2 MINIMÁLNÍ PLOCHA DOTYKU.....	33
2.1.3 MINIMÁLNÍ TLAK.....	36
2.1.4 ELEKTRICKÁ VODIVOST.....	36
2.1.5 TLOUŠŤKA.....	37
3 NÁVRH MĚŘÍCÍHO OBVODU	39
3.1 SENZOROVÝ SNÍMAČ.....	39
3.2 OPERAČNÍ ZESILOVAČ V ZAPOJENÍ JAKO KOMPARÁTOR.....	42
3.3 NÁVRH A REALIZACE ELEKTROD	47
3.4 KOMPLETACE A FINÁLNÍ ÚPRAVA ZAŘÍZENÍ.....	52
4 ODLADĚNÍ A OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI	55
4.1 ZKOUŠENÍ PŘÍPRAVKU A ODLADĚNÍ FUNKČNOSTI.....	55
4.2 OVĚŘOVÁNÍ FUNKČNOSTI NA VYBRANÝCH MATERIÁLECH POUŽÍVANÝCH PRO VÝROBU HASIČSKÝCH RUKAVIC	56
4.3 ÚPRAVA ELEKTRICKÉ VODIVOSTI VYBRANÝCH VZORKŮ	57
ZÁVĚR	59
LITERATURA	61
SEZNAM PŘÍLOH	65

Seznam obrázků

Obr 1.1: Uspořádání vrstev čtyřvodičové dotykové technologie	17
Obr 1.2: Uspořádání vrstev pětivodičové dotykové technologie.....	17
Obr 1.3: Uspořádání sítě elektrod kapacitní dotykové technologie a princip činnosti [12]	19
Obr 1.4: Princip činnosti infračervené dotykové technologie [13].....	20
Obr 1.5: Princip činnosti akustické dotykové technologie [14].....	21
Obr 1.6: Uspořádání elektrod pro měření povrchového odporu	25
Obr 1.7: Uspořádání elektrod pro měření objemového odporu	26
Obr 1.8: Vliv tlaku na uspořádání vodivých částic v textilií	28
Obr 2.1: Tenzometrický snímač se zařízením HTC	31
Obr 2.2: Graf naměřených hodnot síly jednotlivých dotyků v závislosti na čase	31
Obr 2.3: Graf naměřených hodnot síly jednotlivých dotyků v závislosti na čase po úpravě a vyznačení jednotlivých dotyků	32
Obr 2.4: Zaznamenané dotyky.....	34
Obr 2.5: Měření plochy dotyku v softwaru ImageJ	35
Obr 3.1: Schéma senzorového spínače	39
Obr 3.2: Schéma senzorového spínače po modifikaci	40
Obr 3.3: Obvod senzorového snímače, realizovaný na nepájivém propojovacím poli ..	41
Obr 3.4: Schéma obvodu operačního zesilovače v zapojení jako komparátor	44
Obr 3.5: Obvod komparátoru realizovaný na nepájivém propojovacím poli	44
Obr 3.6: Návrh desky plošného spoje obvodu komparátoru	45
Obr 3.7: Deska plošného spoje komparátoru po výrobě.....	46
Obr 3.8: Deska plošného spoje komparátoru po osazení a oživení obvodu	46
Obr 3.9: 3D model klešťových elektrod	48
Obr 3.10: Elektrody pro měření povrchového odporu po realizaci	49
Obr 3.11: Přítlačná destička k elektrodám pro měření povrchové vodivosti.....	50
Obr 3.12: Elektrody pro měření povrchového s přítlačnou destičkou.....	50
Obr 3.13: Elektroda pro měření objemového odporu po realizaci	51
Obr 3.14: Přítlačná elektroda pro měření objemového odporu po realizaci	52
Obr 3.15: Kompletní elektrody pro měření objemového odporu	52

Obr 3.16: Krabička s obvodem komparátoru s vyvedenou LED diodou a vývody pro připojení elektrod.....	53
Obr 3.17: Krabička s obvodem komparátoru – konektor pro napájení obvodu	54
Obr 4.1: Vzorky vybrané pro úpravu vodivosti	58

Seznam Tabulek

Tab 1.1: Porovnání různých dotykových technologií [5]	23
Tab 2.1: Zařízení použita k měření ovládací síly.....	32
Tab 2.2: Výsledky měření ovládací síly	32
Tab 2.3: Výsledky měření ovládací plochy	35
Tab 2.4: Výsledná hodnota minimálního tlaku.....	36
Tab 2.5: Výsledné hodnoty minimální elektrické vodivosti.....	37
Tab 2.6: Výsledky měření maximální tloušťky nevodivého materiálu	37
Tab 3.1: Statická charakteristika tranzistoru IRFZ44N [26]	42
Tab 4.1: Výsledky ověřování funkčnosti.....	55
Tab 4.2: Výsledky ověřování funkčnosti měření na získaných vzorcích textilií.....	56
Tab 4.3: Výsledky ověřování funkčnosti měření na upravených vzorcích textilií	58

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka/Zkratka	Význam	Jednotka
d	Vzdálenost elektrod	[m]
C	Kapacita	[F]
\bar{C}	Parazitní kapacita	[F]
ΔC	Kapacita dotyku	[F]
F	Síla	[N]
F_{\min}	Minimální síla	[N]
G	Vodivost	[S]
ITO	Sloučenina oxidů indiu a cínu	-
In_2O_3	Oxid inditý	-
KNT	Kateddra netkaných textilií	-
l	Délka	[m]
MP3	Typ zvukového formátu	-
NOK	Nevyhovující	-
OK	Vyhovující	-
p	Tlak	[Pa]
p_{\min}	Minimální tlak	[Pa]
PDA	Starší označení kapesního počítače	-
R	Odpor	[Ω]
R_p	Povrchový odpor	[Ω]
S	Plocha	[m ²]
S_{\min}	Minimální plocha	[m ²]
SAW	Akustická dotyková technologie	-
SnO_2	Oxid cíničitý	-
TUL	Technická univerzita v Liberci	-
U_{ref}	Referenční napětí	[V]
U_x	Neznámé napětí	[V]
ρ	Měrný elektrický odpor	[$\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$]
σ	Směrodatná odchylka	-
σ^2	Rozptyl	-
\varnothing_{eq}	Ekvivalentní průměr	[m]

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou ovládání dotykových displejů v případech, kdy je nemůžeme ovládat přímo prstem, ale máme nasazenu rukavici. Důvodem může být bezpečnost (např. zasahující hasiči) nebo komfort (nízké teploty).

Cílem této diplomové práce je sestavit měřicí přípravek pro vyhodnocování vhodnosti materiálů pro ovládání dotykových displejů a otestovat jejich funkčnost.

Tato práce se zabývá v rešeršní části jednotlivými dotykovými technologiemi, se kterými se běžně setkáváme, ale i s méně známými technologiemi, které se používají ve speciálních aplikacích. Mezi běžné technologie lze zařadit odporovou technologii, která se dále rozděluje na čtyřvodičovou a pětivodičovou technologii, a technologii kapacitní. K méně známým a v běžném životě zřídka používaným technologiím v přenosných mobilních zařízeních patří akustická dotyková technologie a optická dotyková technologie. Za zmínku také stojí dvě z nejnovějších dotykových technologií, které se právě dostávají na trh, mezi které patří projekční kapacitní technologie a kombinace odporové a kapacitní technologie.

Práce je rozdělena na čtyři hlavní části. První část práce se zabývá jednotlivými dotykovými technologiemi z hlediska principu činnosti a jejich výhodami a nevýhodami. Druhá část práce je zaměřena na určení elektrických, fyzikálních a mechanických vlastností, které ovlivňují ovládání kapacitních dotykových displejů a stanovení jejich mezních hodnot. Třetí část práce se zabývá návrhem a realizací měřicí aparatury pro vyhodnocování vhodnosti materiálu pro použití k ovládání kapacitních dotykových displejů. Ve čtvrté části práce je popsána příprava vzorků a ověření funkčnosti zařízení na získaných a připravených vzorcích.

1 Rešeršní část

Tato část práce se zabývá jednotlivými dotykovými technologiemi a jejich principy použití při ovládání zařízení vybavených dotykovými displeji.

1.1 Technologie dotykových displejů

Kapesní dotykové přístroje se objevily koncem minulého tisíciletí. Jednalo se hlavně o kapesní počítače (PDA – Personal Digital Assistant), ovládané odporovým displejem pomocí stylusu nebo prstu. Byly na svou dobu nadčasové, ale jako každá novinka drahé. Začátkem nového tisíciletí došlo ke většímu rozmachu těchto dotykových zařízení, hlavně v mobilním průmyslu.

Největší boom dotykových přístrojů přišel v roce 2007, kdy společnost Apple představila svůj Iphone. V tu dobu byla valná většina dotykových přístrojů vybavena odporovou dotykovou technologií. Iphone byl kapacitní. Od té doby se dotykové technologie začaly rychle šířit a zdokonalovat se. Svě místo si našly v chytrých mobilních telefonech, tabletech, PDA, MP3 přehrávačích, navigacích i v elektronických čtečkách knih. Dostaly se do každodenního života díky tomu, že poskytují pohodlné a intuitivní uživatelské rozhraní a staly se jeho nezbytnou součástí pro mnoho lidí různých skupin a nikoliv pouze jedné skupiny např. pouze pro příslušníky mladé generace nebo podnikatele [1][2]. Chytré telefony jsou používány mnoha lidmi po celý den. Sdílejí si fotky a videa s přáteli, komunikují přes mail či jiné textové komunikátory či sociální sítě. Nedávná studie [3] ukázala, že chytré telefony umožňují lidem být online velmi rychle a prakticky kdekoli. Připojení k internetu se stává neplánované, spontánní a všudypřítomné.

Dotykové displeje jsou dnes primární vstupní zařízení chytrých telefonů, tabletů a dalších mobilních přístrojů [4]. Existuje mnoho dotykových technologií, ale rezistivní a kapacitní technologie jim dominují a tlačí kupředu průmysl s dotykovými technologiemi.

V dnešní době se odporová technologie u mobilů příliš nepoužívá, valná většina je založena na ovládání pomocí kapacitní technologie

Jak již bylo zmíněno, dotykové vrstvy displejů jsou založeny na různých technologiích. Mezi čtyři základní technologie se řadí odporová, kapacitní, infračervená a tzv. akustická dotyková technologie (SAW – Surface Acoustic Wave), o kterých pojednávají následující kapitoly.

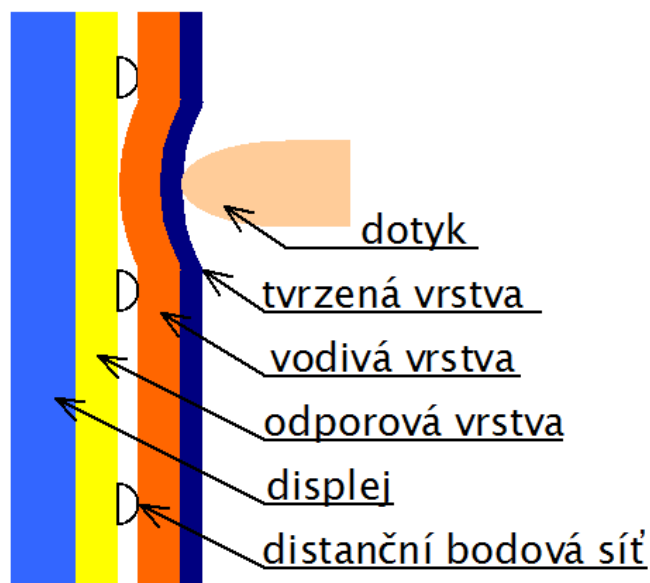
Hlavním bodem zájmu této práce budou displeje s kapacitní technologií, jelikož jako jediné jsou omezeny materiálem ovládacího prvku, konkrétně jeho elektrickou vodivostí. Pokud není ovládacím prvkem lidský prst, musí být materiál ovládacího prvku elektricky vodivý.

1.1.1 Odporová dotyková technologie

Technologie odporových dotykových displejů se dělí na čtyřvodičovou a pětivodičovou. Fungují na principu uzavírání obvodu pomocí elektricky vodivé a odporové vrstvy, které jsou odděleny distanční vymezovací bodovou sítí. U obou odporových technologií je výhodou vysoké dotykové rozlišení. Další výhodou je, že reagují na tlak, proto mohou být ovládány jakýmkoliv předmětem a nejsou citlivé na prach, vodu a jiná znečištění. Odporové dotykové technologie již dnes nejsou u kapesních přístrojů tak běžné, jako dříve. Hlavní nevýhodou je jejich velmi vysoká náchylnost k mechanickému poškození a špatná průzračnost (okolo 80 %), oproti kapacitní technologii (až 93 %) [5].

Čtyřvodičová technologie

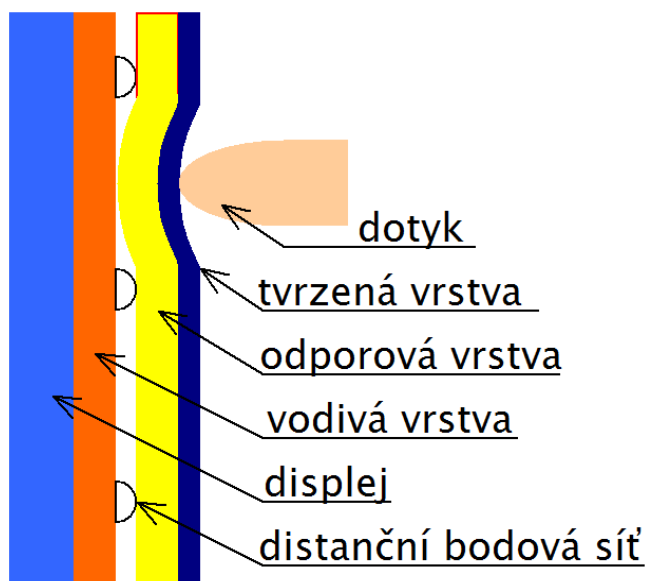
U čtyřvodičové technologie je spodní vrstva odporová a svrchní vrstva vodivá. Čtyřvodičová technologie je méně energeticky náročná, je přesnější a má vyšší reakční rychlost, než technologie pětivodičová. Je ovšem náchylnější na mechanické poškození a nedokáže fungovat po mechanickém poškození svrchní vrstvy.



Obr 1.1: Uspořádání vrstev čtyřvodičové dotykové technologie

Pětivodičová technologie

Pokud je displej zapnutý, prochází u pětivodičové technologie spodní vodivou vrstvou elektrické napětí. Dojde-li k působícím tlakem průhybu svrchní odporové vrstvy, spojí se se spodní vodivou vrstvou a dojde k uzavření obvodu. Na elektrovedivé vrstvě dojde ke změně napětí. To je registrováno kontrolérem, který vyhodnotí souřadnice dotyku.

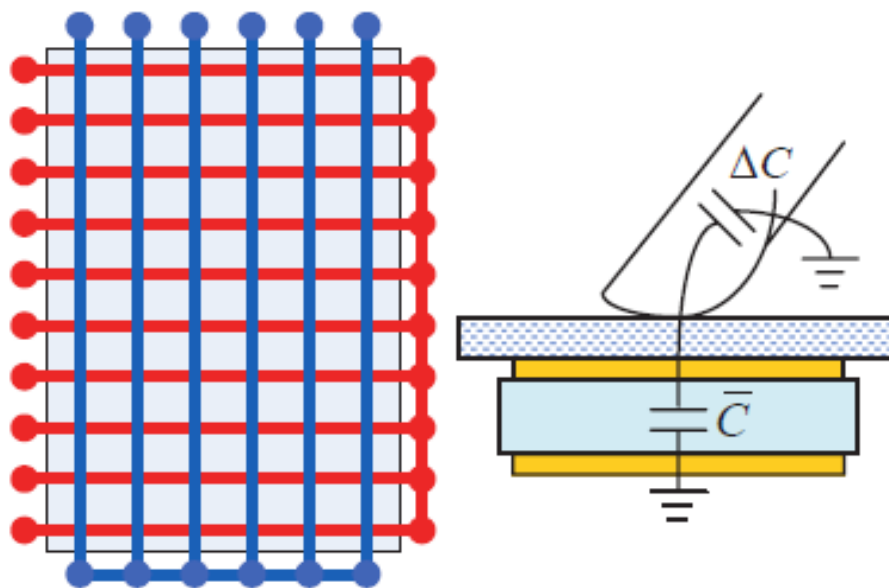


Obr 1.2: Uspořádání vrstev pětivodičové dotykové technologie

1.1.2 Kapacitní dotyková technologie

Kapacitní dotyková technologie je známá déle než 10 let, ale její obrovský rozmach nastal v roce 2007 s představením prvního mobilního telefonu společnosti Apple, Iphonu. Od té doby se staly kapacitní dotykové displeje velice rozšířenými v mobilních aplikacích a dnes jimi disponuje většina kapesních přístrojů od mobilních telefonů, přes tablety, automobilové navigace, MP3 přehrávače až po notebooky [6]. V porovnání s odporovou dotykovou technologií má kapacitní dotyková technologie lepší odolnost danou svrchní tvrzenou vrstvou a nabízí lepší optické vlastnosti. K ovládání displejů s kapacitní dotykovou technologií se nejčastěji používá prstů, méně často potom speciálních stylusů [7].

U této technologie je vnitřní strana elektricky nevodivého dotykového panelu pokryta tenkou transparentní vodivou sítí. Nejčastěji se používá indium tin oxid (ITO). Je to směs dvou oxidů, oxidu india (In_2O_3) a oxidu cínu (SnO_2) typicky 90 %hm. oxidu india a 10 %hm. oxidu cínu [8]. Jeho vysoká elektrická vodivost a transparentnost ho předurčuje jako materiál, vhodný k použití v dotykových displejích [9]. Sít' se skládá z horizontálních a vertikálních vodivých vláken z tohoto materiálu, která jsou od sebe navzájem izolována. Na tuto sít' je přivedeno elektrické napětí. Výsledkem je homogenní elektrostatické pole. Pokud se dotkne vodič, jako je lidský prst, vnější strany dotykového panelu, vytvoří se kondenzátor, viz Obr 1.3, který uzavře elektrický obvod. Senzory kontroléru vyhodnotí polohu dotyku x a y (horizontální a vertikální část sítě) ze změny kapacity na příslušných vodivých vláknech sítě [5][10][11].



Obr 1.3: Uspořádání sítě elektrod kapacitní dotykové technologie a princip činnosti [12]

Mezi jednotlivými elektrodami je stále jistá malá parazitní kapacita \bar{C} , kapacitní snímače však reagují na kapacitu vyvolanou dotykem prstu ΔC . Výsledná kapacita, kterou naměří snímač, odpovídá velikosti součtu obou těchto kapacit, viz vzorec (1).

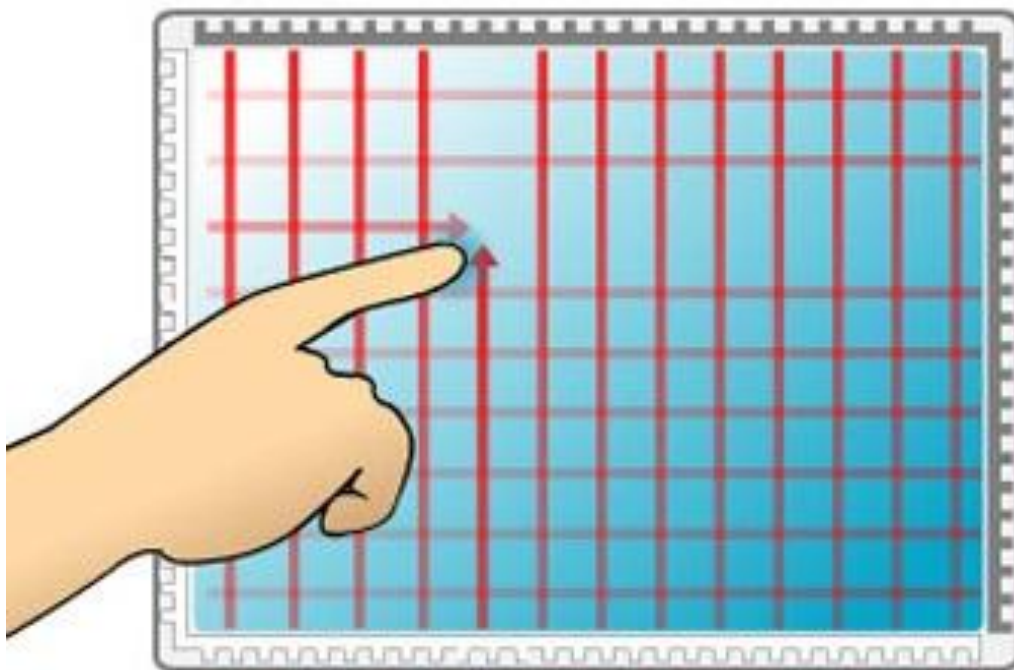
$$C = \bar{C} + \Delta C \quad (1)$$

1.1.3 Infračervená dotyková technologie

Displeje s optickou dotykovou technologií fungují na principu přerušování sítě, tvořené infračervenými světelnými paprsky. Jednotlivé paprsky si lze představit jako světelné závory. Souřadnice jsou vyhodnocovány v osách x a y, které udávají polohu dotyku. Dotyk je detekován na základě přerušování světelného toku příslušných paprsků [5].

Infračervená dotyková technologie není vhodná pro kapesní přístroje. Je citlivá na prach, který přerušuje světelný tok mezi zdrojem světla a senzorem, detekujícím dopadající světlo od příslušného zdroje. Také je citlivá na okolní světlo, jelikož i denní

světlo obsahuje infračervenou složku, na kterou jsou senzory citlivé. Další nevýhodou pro kapesní přístroje je fakt, že technologie se nenachází nad rovinou dotykové plochy displeje, což vede ke zvětšení jeho tloušťky i hmotnosti.

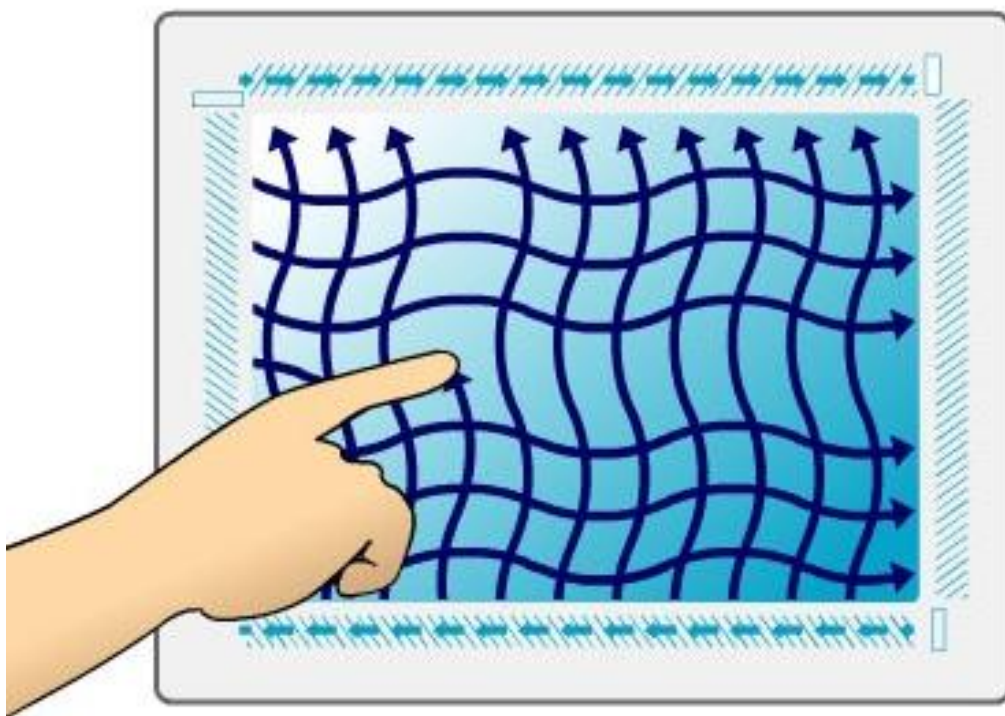


Obr 1.4: Princip činnosti infračervené dotykové technologie [13]

1.1.4 Akustická dotyková technologie

Tato technologie dotykových displejů je založena na principu vysílání akustických vln po skleněném povrchu ovládacího panelu a jejich detekci. Dotkne-li se prst skleněného povrchu, absorbuje část akustického vlnění. Změna vlnění je zaznamenána řídicím obvodem a vyhodnocena jako místo dotyku. Displeje, opatřené touto dotykovou technologií se musí ovládat pouze prstem, prstem v rukavici nebo měkkým stylusem. Nelze je ovládat tvrdými předměty jako například tužka, protože na ně nereagují. Díky náchylnosti na poškození, prach, jiné nečistoty a poškození se nepoužívá pro mobilní telefony a tablety. Nevýhodou je také cena v porovnání s odporovou nebo kapacitní technologií. Naopak obrovskou výhodou této technologie je vysoká světelná propustnost, díky tomu, že není složená z vrstev, ale tvoří ji pouze

jedna transparentní vrstva. Za zmínku také stojí možnost použití na zakřivené povrchy [5].



Obr 1.5: Princip činnosti akustické dotykové technologie [14]

1.1.5 Další technologie

hybridní technologie

V roce 2009 si společnost BlackBerry nechala patentovat hybridní dotykový displej. Jednalo se o období, kdy začala u výrobců převažovat implementace kapacitních displejů do mobilních zařízení, ale veřejnost, zvyklá na ovládání pomocí odporového displeje odmítala kapacitní technologii přijmout. Jednalo se především o lidi zvyklé ovládat zařízení stylusem a ženy, kterým nešlo nehty ovládat displej vybavený kapacitní dotykovou technologií. Údajně vznikl i problém s kapacitní dotykovou technologií v asijských zemích, kde bylo složité na malé ploše displeje zaznamenat jednotlivé znaky jejich abecedy, protože kapacitní technologie ještě nebyla dostatečně přesná pro vykreslení složitých znaků [15].

Přístroj vybavený hybridní technologií obsahuje senzory obou dotykových technologií, jak odporovou, tak kapacitní. Ovladače přístroje v bodě dotyku vyhodnotí příslušný pohyb a podle něj vyhodnotí, kterou technologii uvedou v činnost. Pokud vyhodnotí například dotyk dvou prstů, aktivují se kapacitní senzory, pokud uživatel začne displej ovládat stylusem nebo nehtem, aktivuje se odporová dotyková vrstva.

Touto technologií bylo vybaveno několik modelů v období přechodu z odporové na kapacitní technologii. Nyní se už nepoužívá. Může za to její složitost, cena, špatné optické vlastnosti, dané odporovou technologií, ale také vývoj kapacitní technologie, která je v dnešní době již dostatečně přesná.

floating touch technologie

Tato technologie je postavena na klasické kapacitní technologii, ale liší se typem kapacitních snímačů, kterých jsou známy dva typy. První snímá vlastní kapacitu a druhý vzájemnou. Vzájemná kapacita vytváří sice slabší signál, ale podporuje multi touch (ovládání více prsty najednou). Snímače, které snímají vlastní kapacitu, umožňují ovládání prstem až 2 cm nad povrchem, ale nepodporují multi touch. Technologie floating touch využívá obou typů těchto snímačů, využívaných podobně jako u hybridní technologie, která kombinuje odporovou a kapacitní technologii. Kapacitní technologie využívá k ovládání pouze vzájemné kapacity [16][17].

Technologie		Výhody	Nevýhody
Odporová	4 vodičová	Levná pro malé plochy, Ovládání nezávisí na materiálu	Špatná průhlednost Velmi citlivá na poškrábání Drahá pro velké plochy
	5 vodičová	Levná pro malé plochy, Ovládání nezávisí na materiálu	Špatná průhlednost Velmi citlivá na poškrábání Drahá pro velké plochy
Kapacitní		Dobrá průhlednost, Více dotyků současně Hodí se do nepříznivých podmínek	Citlivá na špínu Ovládání pouze prstem
Akustická		Dobrá průhlednost Použitelné na zakřivený povrch	Citlivá na poškrábání Pomalejší než ostatní Vysoká cena
Infračervená		Dobrá průhlednost Ovládání objektem nepropouštějícím světlo	Citlivá na okolní světlo Vysoká cena Umístění nad displejem

Tab 1.1: Porovnání různých dotykových technologií [5]

1.2 Ovládání kapacitních displejů

Ovládací software kapacitních displejů je optimalizován pro ovládání lidským prstem a tomu odpovídajícím změnám kapacity. Software sleduje změny kapacity na jednotlivých elektrodách. K ovládání displeje, vybaveného kapacitní dotykovou technologií je nutný elektricky vodivý ovládací prvek.

Nejběžněji se k ovládání kapacitních dotykových displejů používá lidského prstu. Ikony a aplikace zařízení vybavených displejem s kapacitní dotykovou technologií jsou optimalizovány k přesnému ovládání pomocí prstu.

Méně obvyklé je ovládání pomocí kapacitního stylusu. Stylus je vyroben z elektricky vodivého materiálu. Jeho průměr se standardně pohybuje od 3 do 9 mm [10]. Elektrickou vodivost kapacitního stylusu se v literatuře nepodařilo zjistit.

Minimální tlak, potřebný k ovládání kapacitních dotykových displejů je uváděn jako hodnota menší, než 50g/cm^2 , což odpovídá 5000 Pa [18].

1.3 Elektrický odpor/vodivost

Velikost elektrického odporu, respektive vodivosti ovládacího prvku kapacitního dotykového displeje, je nutné znát pro úspěšné posouzení, zda je vhodný k jeho ovládání.

Odpor kvantifikuje, jak silně daný materiál působí proti průchodu elektrického proudu. Jednotkou odporu je Ohm a značí se Ω .

Obecně je odpor dán vztahem podle vztahu (2), kde R je určený odpor, ρ je materiálová konstanta známá jako měrný elektrický odpor, l je délka vodiče a S jeho plocha.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (2)$$

Fyzikální veličinou, udávající schopnost vodiče vést elektrický proud je elektrická vodivost. Značí se G a její jednotkou je Siemens [S]. Jedná se o převrácenou hodnotu elektrického odporu, jak vyplývá ze vztahu (3).

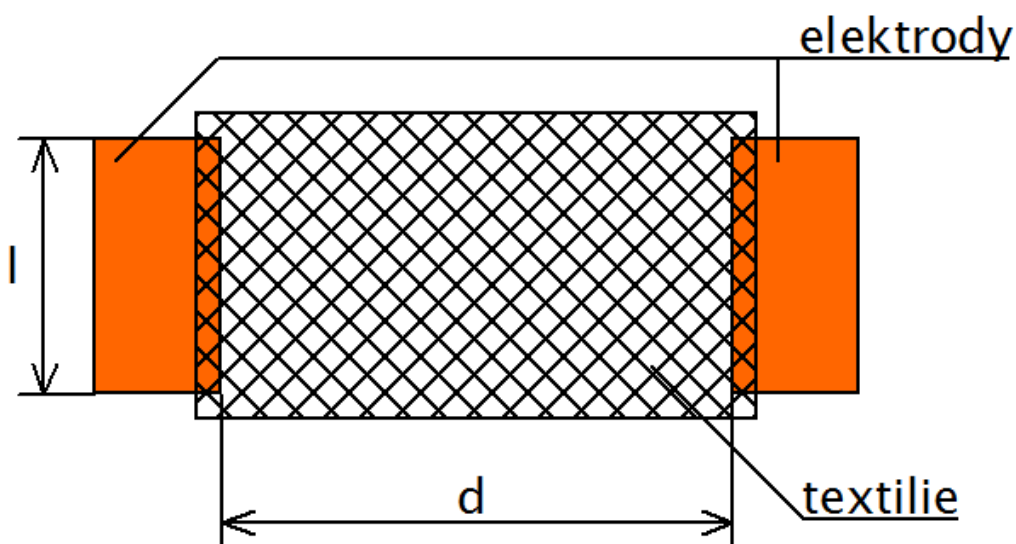
$$G = \frac{1}{R} \quad (3)$$

1.4 Měření povrchového elektrického odporu/ vodivosti

Povrchový odpor je odpor materiálu v jeho povrchové vrstvě. Velikost takového odporu je dána vzdáleností, na kterou je měřen, délkou elektrod, mezi kterými je měřen a odporem naměřeným mezi nimi.

Velikost povrchového odporu je dána vztahem (4), kde R je odpor naměřený mezi elektrodami, d je vzdálenost elektrod a l je jejich délka. Jednotkou povrchového odporu je Ohm na čtverec a značí se Ω/\square nebo ohm/sq [19][20][21]

$$R_p = R \frac{d}{l} \quad (4)$$

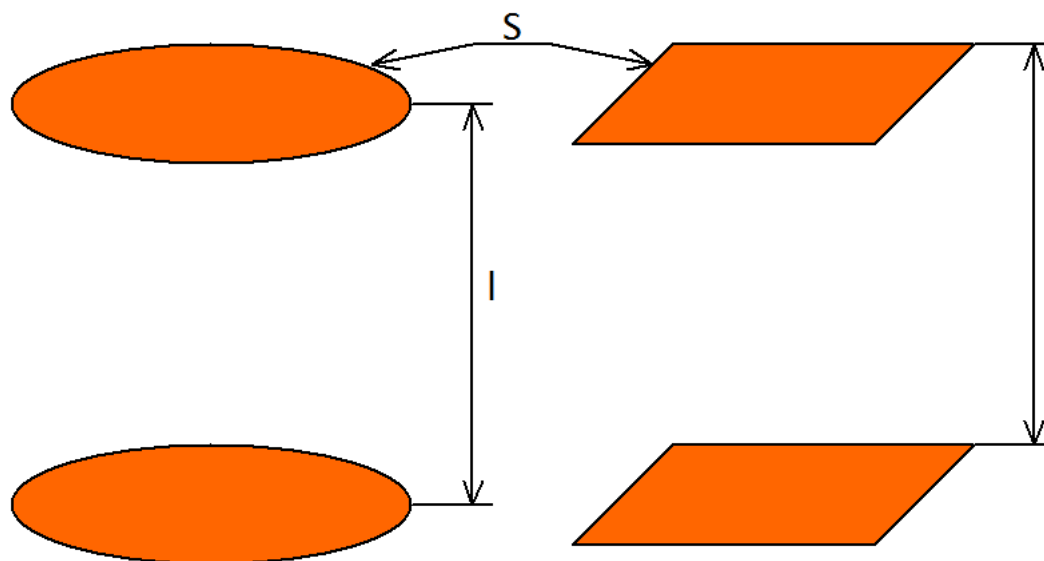


Obr 1.6: Uspořádání elektrod pro měření povrchového odporu

1.5 Měření objemového elektrického odporu/ vodivosti

Objemový odpor je odpor materiálu v jeho celé vrstvě. Velikost takového odporu je přímo závislá na materiálové konstantě, vzdálenosti, na kterou je měřen, a nepřímo úměrná ploše průřezu elektrod, mezi kterými je měřen.

Velikost objemového odporu vychází ze vztahu (2), kde ρ je měrný elektrický odpor (materiálová konstanta), S je plocha průřezu elektrody a l je vzdálenost elektrod. Elektrody pro měření objemového odporu jsou zřejmé z Obr 1.7 [19][21].



Obr 1.7: Uspořádání elektrod pro měření objemového odporu

1.6 Elektricky vodivé textilie

Elektricky vodivé textilie jsou využívány především pro jejich schopnost odvádět elektrický náboj, proto jsou vhodné do velmi čistých nebo nebezpečných prostor. Například při výrobě elektroniky, kde by mohl elektrostatický výboj způsobit destrukci součástek nebo v prostorech s nebezpečím výbuchu by mohly vzplanout hořlavé páry či látky [19].

Pro zvýšení elektrické vodivosti textilií existuje více možností. U polymerních vláken lze upravovat elektrickou vodivost materiálu již v počáteční fázi výroby chemickou modifikací polymeru nebo přidáním látek upravujících vodivost do polymerního roztoku nebo taveniny [22], přičemž elektrická vodivost může vzrůst o několik řádů a dosáhnout vodivosti mědi nebo stříbra [23].

Zvyšování elektrické vodivosti se dále upravuje v průběhu předení, kde se k nevodivým vláknům přidávají vodivé částice nebo vlákna v určitém poměru, aby byla zajištěna žádaná elektrická vodivost, nebo se oplétají vodivými materiály. Při výrobě textilie tkaním nebo pletením mohou být použita vodivá lanka nebo drátky zakomponované do struktury textilie. Dalšími možnostmi jak zvýšit elektrickou

vodivost textilií jsou pak různé finální úpravy jako zátěry zvyšující vodivost, nanášení vodivých částic ve formě prášku či roztoku a jejich následná fixace uvnitř nebo na povrchu materiálu.

1.7 Tlak a měření tlaku

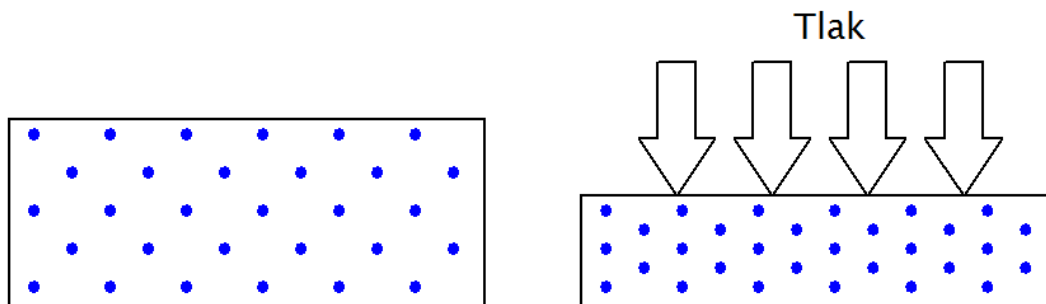
Tlak je fyzikální veličina, daná vztahem (5), vyjadřující poměr velikosti síly F působící kolmo na rovinnou plochu S . Obvykle se značí p a její jednotkou je Pascal.

$$p = \frac{F}{S} \quad (5)$$

U stlačitelných materiálů se důsledkem tlaku materiál deformuje. U textilií dochází k přiblížení vláken a jejich deformaci. Ta může být vratná a nevratná. To je dáno mechanickými vlastnostmi materiálu a strukturními vlastnostmi dané textilie.

U elektricky vodivých textilií dochází působením tlaku k deformaci, která má za následek přiblížení vodivých částic a tím dochází ke změně vodivosti. Proto je nutné zohlednit velikost tlaku při testování vodivosti elektricky vodivých textilií.

S působícím tlakem se zmenšuje celkový objem textilního materiálu, se kterým roste objemový podíl elektricky vodivých částic v objemu textilie, viz Obr 1.8. Působením tlaku a jím vyvolaným přibližováním částic lze pozorovat skokovou změnu hodnoty vodivosti, ke které dochází při dosažení kritického poměru vodivých částic na jednotku objemu. Tento jev je často nazýván jako elektrický perkolační práh [22]. Proto je při měření elektrické vodivosti textilií důležitá velikost tlaku.



Obr 1.8: Vliv tlaku na uspořádání vodivých částic v textili

Norma pro měření tlaku u textilií EDANA [24] udává různou velikost tlaku pro různé tloušťky materiálu. To ovšem není možné u textilií pro ovládání dotykových displejů, jelikož velikost jejich elektrické vodivosti musí být splněna již při nejnižší hodnotě tlaku. Při vyšších hodnotách tlaku se zvětšuje i ovládací plocha, která může způsobovat zmenšení přesnosti ovládání a tím i uživatelský komfort. S rostoucí velikostí tlaku také narůstají požadavky na mechanickou odolnost a může dojít až k destrukci displeje.

2 Praktická část

Na základě poznatků získaných v předešlé kapitole byly vybrány parametry textilie, které musí být splněny pro spolehlivé ovládání dotykového displeje.

2.1 Zjišťování referenčních hodnot

Z odborných článků a dostupných dokumentací se nepodařilo zjistit konkrétní hraniční hodnoty veličin ovlivňujících ovládání kapacitního dotykového displeje, ze kterých by bylo možné vycházet při návrhu měřicího zařízení. Proto bylo rozhodnuto tyto hraniční hodnoty stanovit experimentálně, a z nich poté vycházet při zhotovení měřicího obvodu.

Hraničními hodnotami jsou myšleny minimální hodnoty, které musí textilie splňovat, aby její pomocí bylo možné ovládat dotykový displej.

Pro testování veličin, ovlivňujících ovládání kapacitního dotykového displeje bylo rozhodnuto určit hodnoty:

- minimální ovládací síly
- minimální plochy, na kterou síla působí
- minimálního tlaku působícího na displej
- minimální elektrické vodivosti textilie
- maximální tloušťky

Elektricky nevodivá textilie je schopna ovládat kapacitní dotykový displej, pokud je její tloušťka dostatečně malá a příliš nesníží kapacitu prstu, který displej přes textilií ovládá. Z tohoto důvodu je vhodné zjišťovat také vliv tloušťky.

2.1.1 Minimální ovládací síla

Velikost minimální ovládací síly je nutné znát pro spolehlivé posouzení vhodnosti materiálu, určeného pro ovládání kapacitního dotykového displeje. Působením síly se textilie deformuje a mění se její tloušťka i elektrická vodivost. Pokud by nebyla stanovena velikost minimální ovládací síly, nemohly by být objektivně posouzeny různé druhy textilií.

Měření minimální ovládací síly bylo prováděno pomocí univerzálního testovacího zařízení LaborTech 2.050. Tenzometrický snímač, připojený k počítači zaznamenával průběh působící síly v závislosti na čase. Na snímač byla postupně pokládána zapnutá dotyková zařízení s kapacitními displeji (viz níže), na kterých byla uskutečněna série dotyků minimální silou tak, aby displeje reagovaly na jednotlivé impulzy. Potřebná síla byla přenesena ze zařízení na snímač.

Postup měření minimální ovládací síly byl následující. Zařízení vybavené kapacitním dotykovým displejem bylo umístěno na tenzometrický snímač o rozsahu 5 N. Na zapnutém zařízení se na displeji nastavilo psaní zprávy, pro lepší vizuální kontrolu uskutečnění dotyku a ověření, že jej displej detekoval. Následně byla z hodnoty síly odečtena hmotnost přístroje a zaznamenávaly se pouze jednotlivé dotyky prstu bez velikosti síly, vyvolané hmotností mobilního zařízení. Poté bylo na počítači v softwaru zkušebního zařízení nastaveno zaznamenávání průběhu síly v závislosti na čase a započaly se uskutečňovat jednotlivé dotykové impulzy psaním jednotlivých znaků na dotykové klávesnici. Pro přesnější určení hodnoty minimální ovládací síly byla zaznamenána série dotyků, která by měla zajistit přesnější získání hledané hodnoty. Software v počítači zaznamenával průběh působení síly na připojeném tenzometrickém snímači a ukládal jej pro pozdější zpracování.

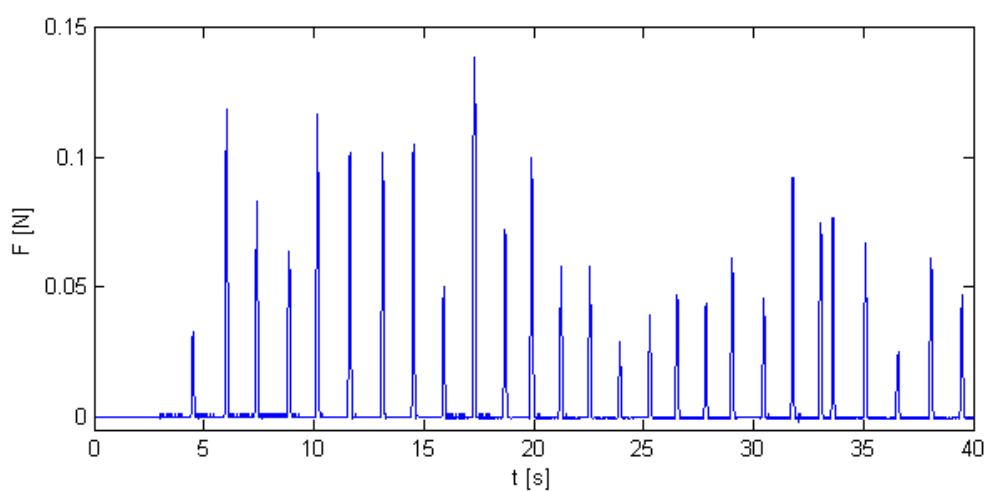
Zpracování naměřených dat bylo prováděno programem MATLAB. Nejdříve došlo k odstranění šumových hodnot. Existují zde funkce, které jsou schopny vyhledat zaznamenané průběhy křivek, ale jejich nevýhodou je ovlivnění a zkreslení maxim, které jsou v tomto případě předmětem zkoumání. K vyhlazení proto bylo zvoleno pouze odstranění šumových hodnot pod úrovní 0,025 N od nuly, které ovlivňovaly vyhledání maximálních hodnot. Poté se vyhledaly maximální hodnoty každého dotyku pomocí

příkazu *findpeaks*, jak je znázorněno na Obr 2.3 a z těchto hodnot byl vypočítán aritmetický průměr, rozptyl a směrodatná odchylka.

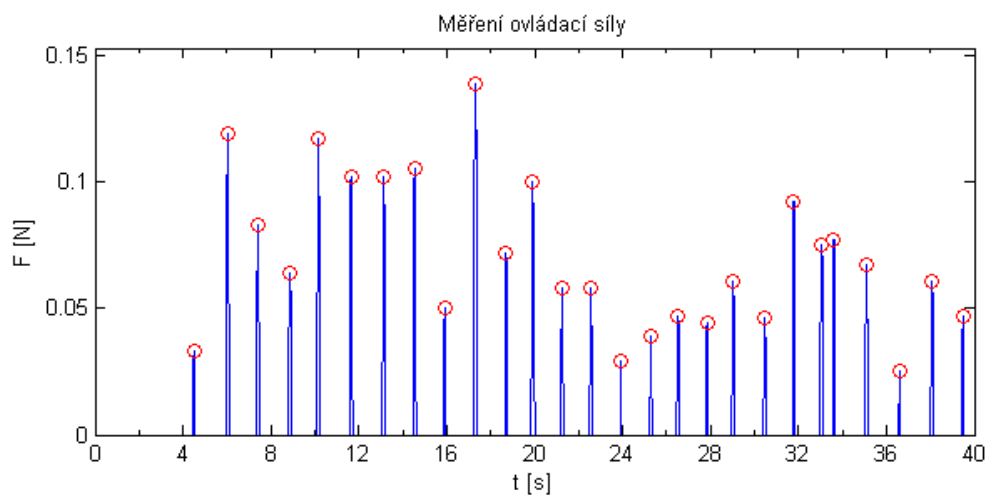
Na Obr 2.2 je ukázka naměřených hodnot na přístroji HTC. Na Obr 2.3 jsou již zpracovaná data, ze kterých jsou zřejmé maximální hodnoty síly, které se dále statisticky zpracovávají a vyhodnotily pomocí softwaru Matlab.



Obr 2.1: Tenzometrický snímač se zařízením HTC



Obr 2.2: Graf naměřených hodnot síly jednotlivých dotyků v závislosti na čase



Obr 2.3: Graf naměřených hodnot síly jednotlivých dotyků v závislosti na čase po úpravě a vyznačení jednotlivých dotyků

Použitá zařízení
tenzometrický snímač $F_{\max} = 5\text{N}$, $f_{\text{vz}} = 100\text{ Hz}$
mobilní telefon HTC wildfire
mobilní telefon BlackBerry Q5
tablet Apple Ipad II

Tab 2.1: Zařízení použitá k měření ovládací síly

Měřením na jednotlivých přístrojích nebyly shledány významné rozdíly, proto byla vyhodnocena průměrná hodnota minimální ovládací síly, potřebné k ovládnutí kapacitního dotykového displeje ze všech naměřených hodnot, viz Tab 2.2.

Minimální ovládací síla	F_{\min}	0,0708 N
Rozptyl	$\sigma^2(F)$	0,0009
Směrodatná odchylka	$\sigma(F)$	0,0301

Tab 2.2: Výsledky měření ovládací síly

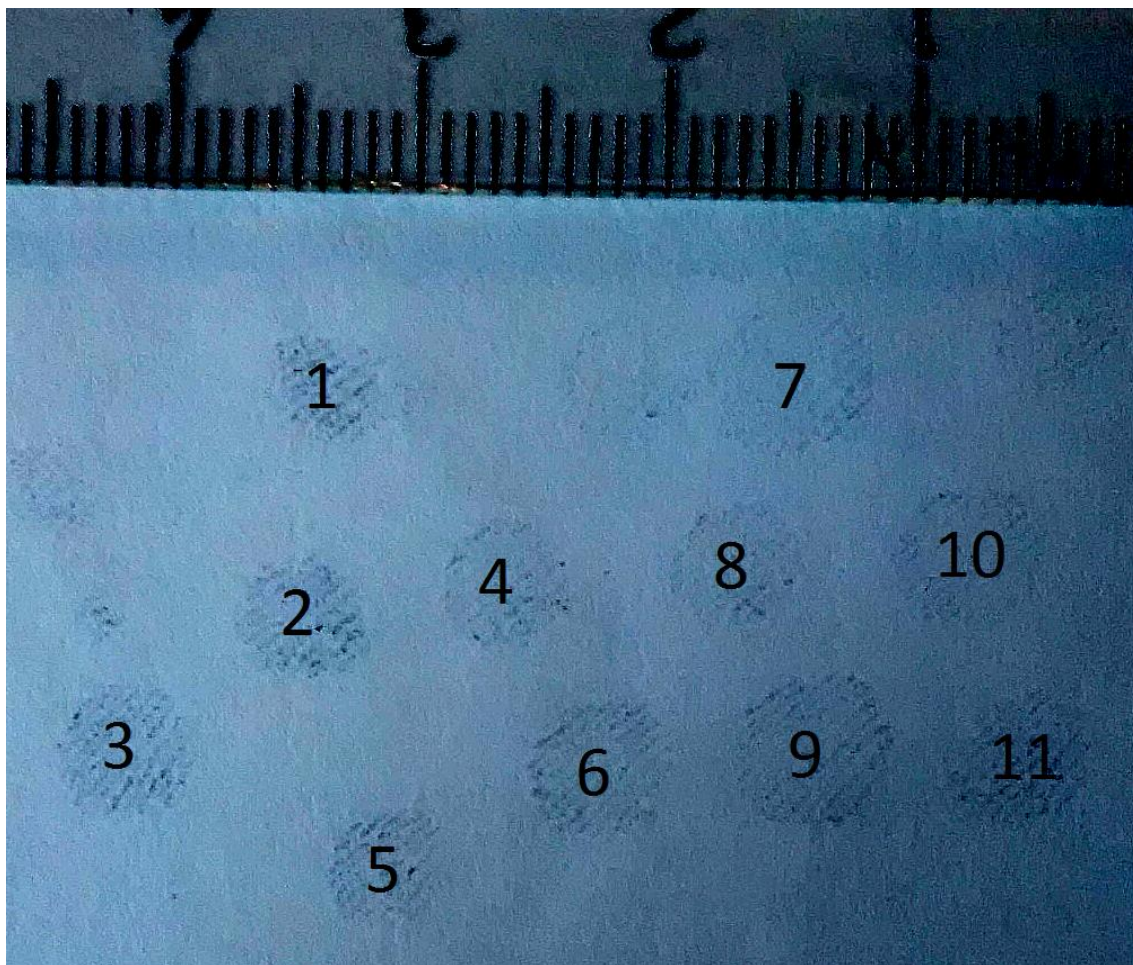
2.1.2 Minimální plocha dotyku

Znalost velikosti minimální plochy dotyku je důležitá pro určení vhodnosti materiálu pro ovládání kapacitních dotykových displejů. Velikost plochy určuje plošnou elektrickou vodivost textilie a také tlak, vyvolaný působením síly na displej

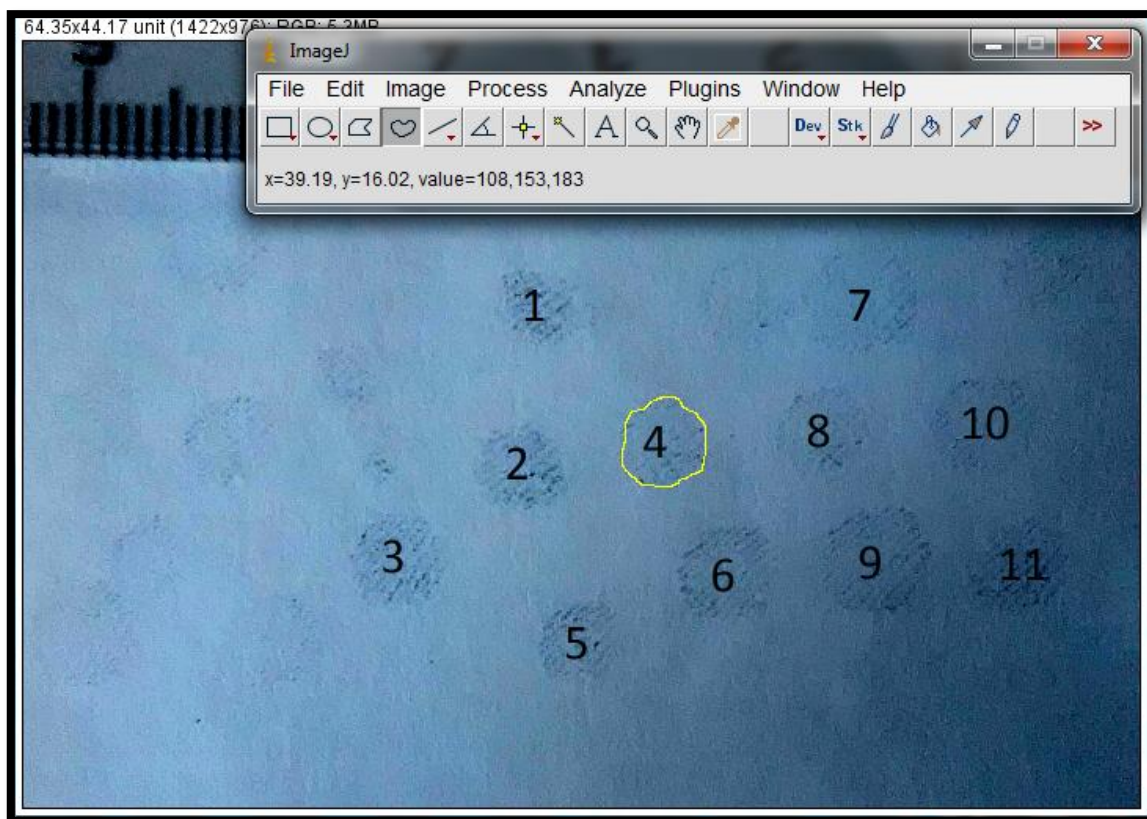
Měření minimální velikosti plochy dotyku probíhalo opět na tenzometrickém snímači, ale tentokrát mohlo být prováděno na vypnutém displeji, jelikož nebyla důležitá vizuální kontrola dotyku. K tomu sloužil tenzometrický snímač. Na displeji mobilního telefonu byl položen bílý papír, na kterém byly zanechány otisky prstu.

Postup měření minimální velikosti plochy dotyku probíhalo následovně. Na tenzometrický snímač bylo umístěno zařízení s dotykovým displejem. Na displej zařízení byl volně položen bílý papír. Prstem, potřeným černým uhlíkovým práškem se na bílém papíře vytvářely otisky. Na displeji počítače, ke kterému byl připojen tenzometr, byla sledována hodnota síly. Síla odpovídala minimální ovládací síle, zjištěné měřením, popsaným v předchozí kapitole. Pro přesnější určení hodnoty minimální plochy dotyku byla uskutečněna série dotyků, která by měla zajistit přesnější získání hledané hodnoty.

Papír s otisky byl zaznamenán fotograficky s příslušným měřítkem, viz Obr 2.4. Fotografie s otisky byl upraven jas a kontrast v programu ImageJ, aby otisky byly zřetelnější a snadněji ohraničitelné. Ve stejném programu byly funkcí měření plochy zjištěny jednotlivé velikosti dotykových ploch. Plochy byli díky měřítku již v potřebných jednotkách. Program dovoluje ukládat naměřená data do souboru, čehož bylo s výhodou využito. Pro zpracování naměřených dat byl opět využit program MATLAB. Výpočtem aritmetického průměru byla zjištěna hodnota minimální plochy dotyku pro ovládání dotykového displeje. Výsledky včetně statistického zpracování jsou v Tab 2.3.



Obr 2.4: Zaznamenané dotyky



Obr 2.5: Měření plochy dotyku v softwaru ImageJ

Měřením na jednotlivých přístrojích byla vyhodnocena průměrná hodnota minimální plochy potřebné k ovládání kapacitního dotykového displeje. Dále byl určen ekvivalentní průměr, viz Tab 2.3, který udává průměr kruhu o stejné ploše, jako je plocha průmětu dotyku.

Minimální ovládací plocha	S_{\min}	$23,77355 \text{ mm}^2$
Rozptyl	$\sigma^2(S)$	26,3034
Směrodatná odchylka	$\sigma(S)$	5,1287
Ekvivalentní průměr	\varnothing_{eq}	5,47 mm

Tab 2.3: Výsledky měření ovládací plochy

2.1.3 Minimální tlak

Minimální tlak je důležité znát pro návrh elektrod a objektivní posouzení vhodnosti textilií k ovládání kapacitních dotykových displejů. Jeho velikost dokonce ovlivňuje i vodivost dané textilie, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.7. Zvolení příliš vysokého tlaku by mohlo vést ke špatné kvalifikaci textilie v souvislosti s vodivostí, která by byla například dosažitelná pouze při tlaku, který by mohl mít za následek poškození nebo destrukci displeje.

Tlak nebyl měřen experimentálně, ale určován z naměřených hodnot minimální ovládací síly a minimální plochy dotyku. Tyto hodnoty byly dosazeny do vztahu (5). Zjištěný tlak je uveden v Tab 2.4 a dosahuje hodnoty 2978,1 Pa.

Plocha	S	23,77355 mm ²
Síla	F	0,0708 N
Minimální tlak	p_{\min}	2978,1 Pa

Tab 2.4: Výsledná hodnota minimálního tlaku.

2.1.4 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost materiálu je nejdůležitější veličinou, která ovlivňuje jeho vhodnost k ovládání kapacitních dotykových displejů.

Hodnoty minimální elektrické vodivosti byly stanoveny pro konstrukci elektrod, které se věnuje následující část práce. Ke stanovení hodnoty minimální elektrické vodivosti byly zvoleny jako referenční materiál komerční bavlněné dotykové rukavice, zakoupené v obchodě s elektronikou. Naměřené hodnoty vodivosti jsou uvedeny v Tab 2.5.

	Pokožka prstu	Dotyková rukavice
Minimální plošná vodivost	375 nS/□	2,5 nS/□
Minimální objemová vodivost	250 nS	50 nS

Tab 2.5: Výsledné hodnoty minimální elektrické vodivosti

2.1.5 Tloušťka

Jelikož u kapacitní technologie je nad vodivou sítí umístěno tvrzené krycí sklo, bylo zajímavé zjistit, přes jak silnou nevodivou vrstvu textilního materiálu bude dotykový displej ještě spolehlivě fungovat a detekovat dotykové impulzy.

Pro zjištění minimální tloušťky elektricky nevodivého materiálu byl vybrán vzorník netkaných textilií vyrobených technologií spunbond od Indické společnosti Fiberweb. Vzorník obsahoval netkané textilie různých gramáží, kde s rostoucí gramáží roste i tloušťka textilií. Výhodou bylo také, že vzorky netkaných textilií ve vzorníku nebyly chemicky upravované povrchově aktivní látkou a tím byla zajištěna objektivnost z hlediska shodných elektrických vlastností materiálu.

Gramáž vzorku [g/m ²]	Tloušťka vzorku [mm]	funkčnost
17	0,18	OK
18	0,2	OK
40	0,31	OK
50	0,38	OK
60	0,43	NOK
70	0,45	NOK
80	0,48	NOK
90	0,55	NOK
100	0,58	NOK
110	0,6	NOK

Tab 2.6: Výsledky měření maximální tloušťky nevodivého materiálu

Výsledky měření jsou zřejmé z Tab 2.6. S rostoucí gramáží a tím i tloušťkou roste vliv elektricky nevodivé vrstvy na ovládání dotykových displejů vybavených kapacitní dotykovou technologií. Měření bylo prováděno subjektivním hodnocením jednotlivých vzorků na několika zařízeních s kapacitními dotykovými displeji. Tuto hodnotu jistě ovlivňují dielektrické vlastnosti použitého materiálu, jeho elektrická vodivost, zaplnění textilie. V tomto případě lze považovat za hraniční tloušťku hodnotu okolo 0,4 mm.

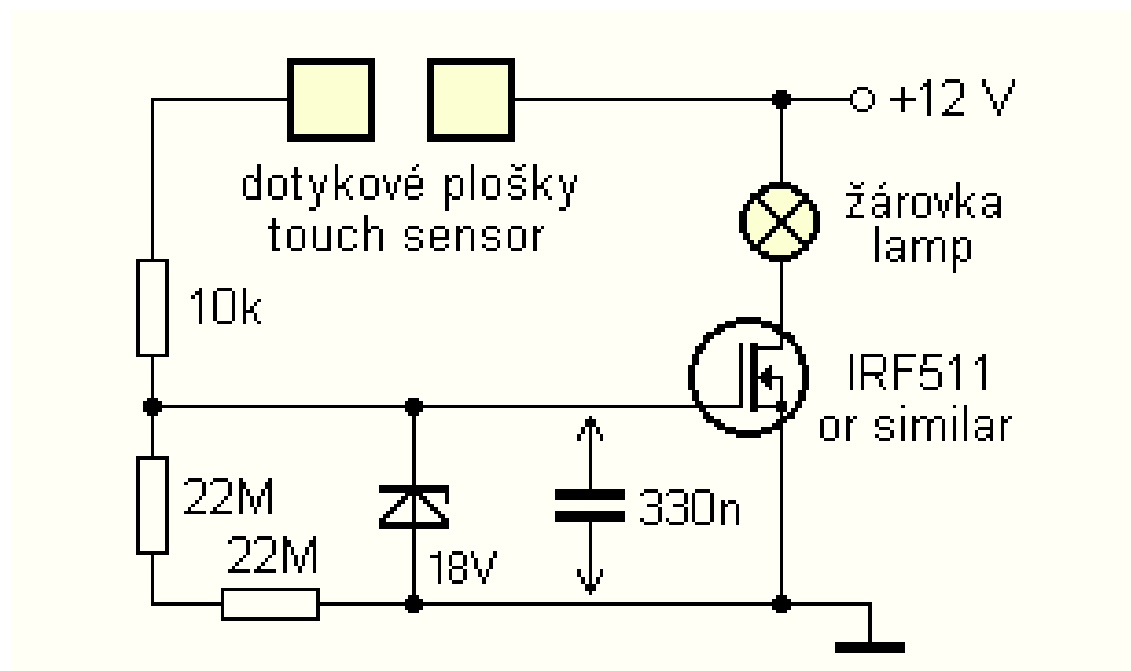
3 Návrh měřicího obvodu

Z rešeršní části vyplývají základní vlastnosti a nároky na ovládání kapacitních dotykových displejů, ze kterých vychází návrh a realizace měřicího přípravku. V praktické části byly určeny hraniční hodnoty veličin ovlivňujících ovládání kapacitního dotykového displeje, ze kterých se bude vycházet při návrhu obvodu a konstrukci měřicích elektrod.

Od měřicího obvodu je očekáváno, aby při určité minimální hodnotě elektrické vodivosti objektivně posuzoval vhodnost materiálu pro použití k ovládání kapacitního dotykového displeje.

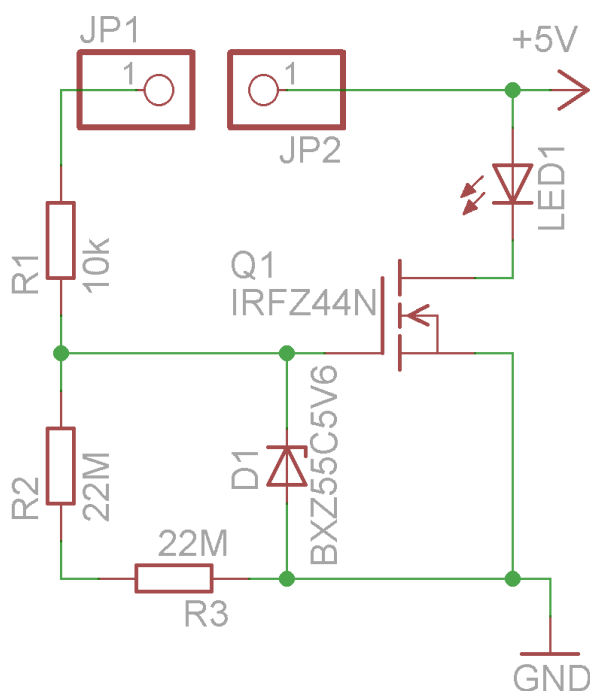
3.1 Senzorový snímač

Inspirací k prvnímu měřicímu přípravku byl obvod nazvaný „senzorový spínač“ z literatury [25]. Tímto obvodem na Obr 3.1 je možno spínat i poměrně velký výkon.



Obr 3.1: Schéma sensorového spínače

Po prostudování bylo rozhodnuto obvod modifikovat. Z původního návrhu byla odstraněna žárovka nahrazena LED diodou, která byla vhodnějším optickým indikátor z hlediska životnosti LED diody a její energetické náročnosti. Dále byl z návrhu obvodu odstraněn kondenzátor, jehož funkcí v obvodu bylo, že poté, co dojde k rozpojení senzoru, udržuje obvod ještě určitou dobu v sepnutém stavu v závislosti na velikosti kapacity, což bylo pro účel použití obvodu nevhodné. Naopak by to prodlužovalo dobu, po kterou by byl obvod neaktivní a muselo by se vyčkat na jeho připravenost k dalšímu měření.



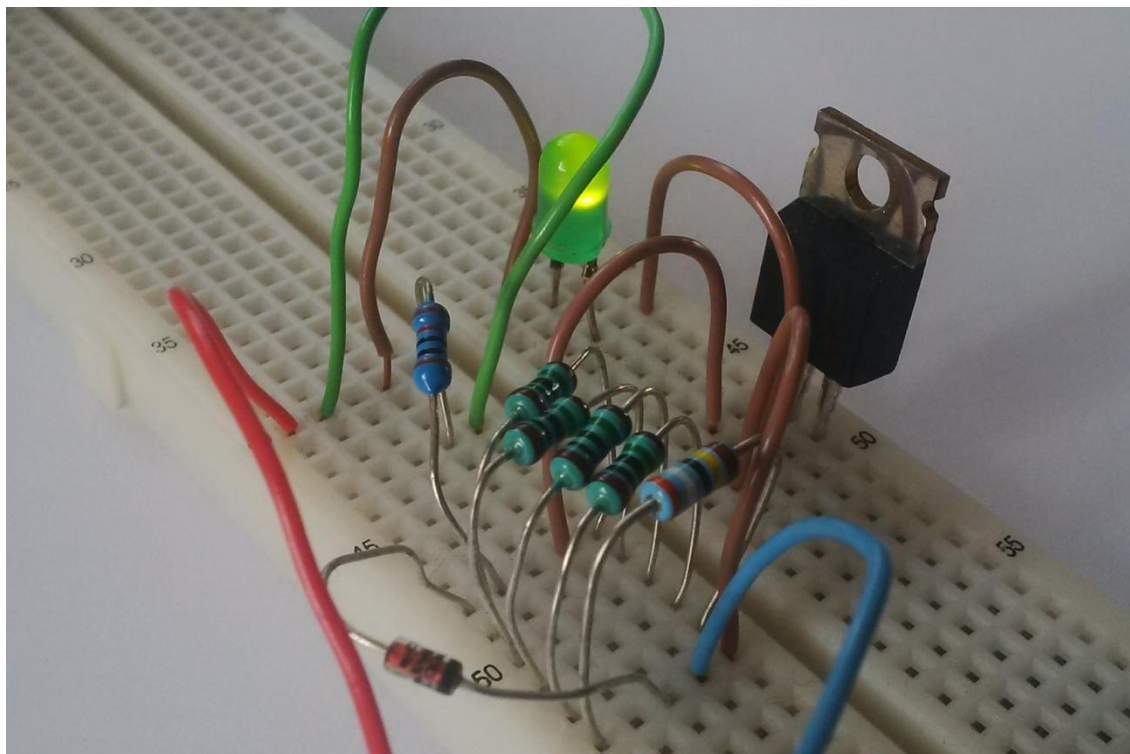
Obr 3.2: Schéma senzorového spínače po modifikaci

Tvůrce obvodu uvádí, že lze použít libovolný tranzistor HEXFET, podle velikosti spínaného výkonu. Jelikož jsme se nechystali spínat velký výkon, ale pouze LED diodu s odběrem proudu 20 mA, náš výběr byl prakticky neomezený. V laboratoři KNT byl vybrán tranzistor IRFZ44N, který byl zcela vhodný k ovládání daného obvodu.

Tranzistory HEXFET jsou polem řízené výkonové tranzistory MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Vodivost kanálu mezi elektrodami

Source a Drain je ovládána elektrickým polem, pomocí elektrody Gate, která je tvořena strukturou kov, oxid křemíku a polovodič.

Po získání všech potřebných součástek byl realizován provizorní obvod na nepájivé propojovací pole, viz Obr 3.3, pro odzkoušení funkčnosti a vhodnosti obvodu k řešení problematiky.



Obr 3.3: Obvod senzorového snímače, realizovaný na nepájivém propojovacím poli

Jak se později ukázalo, obvod fungoval podle předpokladů – po spojení elektrod prsty sepnul tranzistor a rozsvítil LED diodu. Nebylo však u něj realizovatelné regulovat rozsah a citlivost spínání v závislosti na elektrické vodivosti mezi měřícími elektrodami. Na vině byla volba nevyhovujícího spínacího prvku v podobě tranzistoru HEXFET. U tranzistorů obecně se řídí spínání velikostí napětí na řídící elektrodě (v případě tranzistorů HEXFET se tato elektroda značí G – Gate). Velikost tohoto napětí je dáno výrobcem. Problémem je, že výrobce uvádí pro toto napětí tři hodnoty. MIN – minimální, TYP – typické a MAX – maximální viz Tab 3.1. Tyto hodnoty udávají, v jakém rozsahu napětí na řídící elektrodě se tranzistor dokáže otevřít a sepnout. Tento rozsah je v řádu jednotek voltů. Důsledkem toho je velice obtížné

nastavit obvod s tranzistorem tak, aby spínal pouze při určité hodnotě napětí, daném vodivostí mezi měřicími elektrodami. Muselo by se s nastavením pohybovat v hodnotách minimálního napětí potřebného k otevření tranzistoru, a i v případě individuálního nastavení obvodu tak, aby spínal dle předpokladů, by při změně spínacího prvku za totožný, i od stejného výrobce, nefungoval shodně jako v předešlém případě, což by velmi ztěžovalo opakovatelnost vlastností obvodu.

STATIC CHARACTERISTICS

$T_{mb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source breakdown voltage	$V_{GS} = 0\text{ V}; I_D = 0.25\text{ mA}$	60	-	-	V
$V_{GS(th)}$	Gate threshold voltage	$V_{DS} = V_{GS}; I_D = 1\text{ mA}$	2.1	3.0	4.0	V
I_{DSS}	Zero gate voltage drain current	$V_{DS} = 60\text{ V}; V_{GS} = 0\text{ V}; T_J = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	-	1	10	μA
I_{DSS}	Zero gate voltage drain current	$V_{DS} = 60\text{ V}; V_{GS} = 0\text{ V}; T_J = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$	-	0.1	1.0	mA
I_{GSS}	Gate source leakage current	$V_{GS} = \pm 30\text{ V}; V_{DS} = 0\text{ V}$	-	10	100	nA
$R_{DS(ON)}$	Drain-source on-state resistance	$V_{GS} = 10\text{ V}; I_D = 20\text{ A}$	-	0.03	0.038	Ω
		BUK455-60A	-	0.04	0.045	Ω
		BUK455-60B	-			

Tab 3.1: Statická charakteristika tranzistoru IRFZ44N [26]

seznam součástek

rezistory	1 x 10 k Ω
	2 x 22 M Ω
LED dioda libovolné barvy	
tranzistor	IRFZ44N
zenerova dioda	BXZ55C5V6

3.2 Operační zesilovač v zapojení jako komparátor

Vzhledem k nevýhodám předchozího návrhu musel být navrhnout obvod s vhodnějším ovládacím prvkem, umožňujícím spolehlivé reakce na změny způsobené různou vodivostí testovaných materiálů. K tomuto účelu byl vybrán obvod s operačním zesilovačem v zapojení jako komparátor.

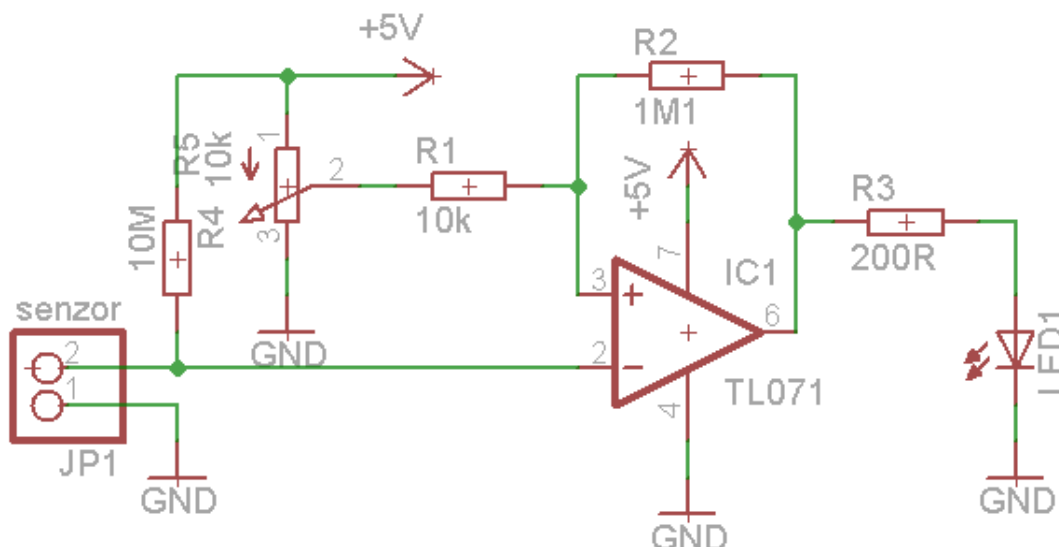
Operační zesilovač je polovodičová součástka vyráběná formou integrovaného obvodu vyznačující se velkým napětovým zesílením. Operační zesilovač má dva vstupy (invertující a neinvertující vstup) a jeden výstup. Je základním prvkem analogových elektronických systémů. Pro operační zesilovače lze použít v mnoho variant zapojení a tím dosáhnout požadované funkce v obvodu. Vlastnosti operačního zesilovače jsou dány zapojením a vlastnostmi prvků zapojených v jeho okolí. Pro realizaci obvodu pro posuzování materiálů podle vodivosti z hlediska vhodnosti pro použití k ovládání kapacitních dotykových displejů bylo vybráno zapojení operačního zesilovače jako komparátoru.

Operační zesilovač v zapojení jako komparátor [27] s nesymetrickým napájením porovnává neznámé napětí U_x s referenčním napětím U_{ref} . Jestliže je neznámé napětí větší nebo rovno referenčnímu napětí, na výstupu operačního zesilovače je nulové napětí. Pokud hodnota neznámého napětí klesne pod hodnotu referenčního napětí, na výstupu obvodu se díky vysokému zesílení operačního zesilovače objeví maximální hodnota napětí daná napájecím napětím.

Referenční napětí je nastavováno pomocí potenciometru/trimru R_4 na Obr 3.4, zapojeného do napětového děliče s rezistorem R_1 . Hodnota neznámého napětí je dána odporovým děličem, tvořeným rezistorem R_5 a odporem daným materiálem na mezi elektrodami. Díky použití proměnného odporu, je možné obvod nastavit přesně na požadovanou hodnotu spínání.

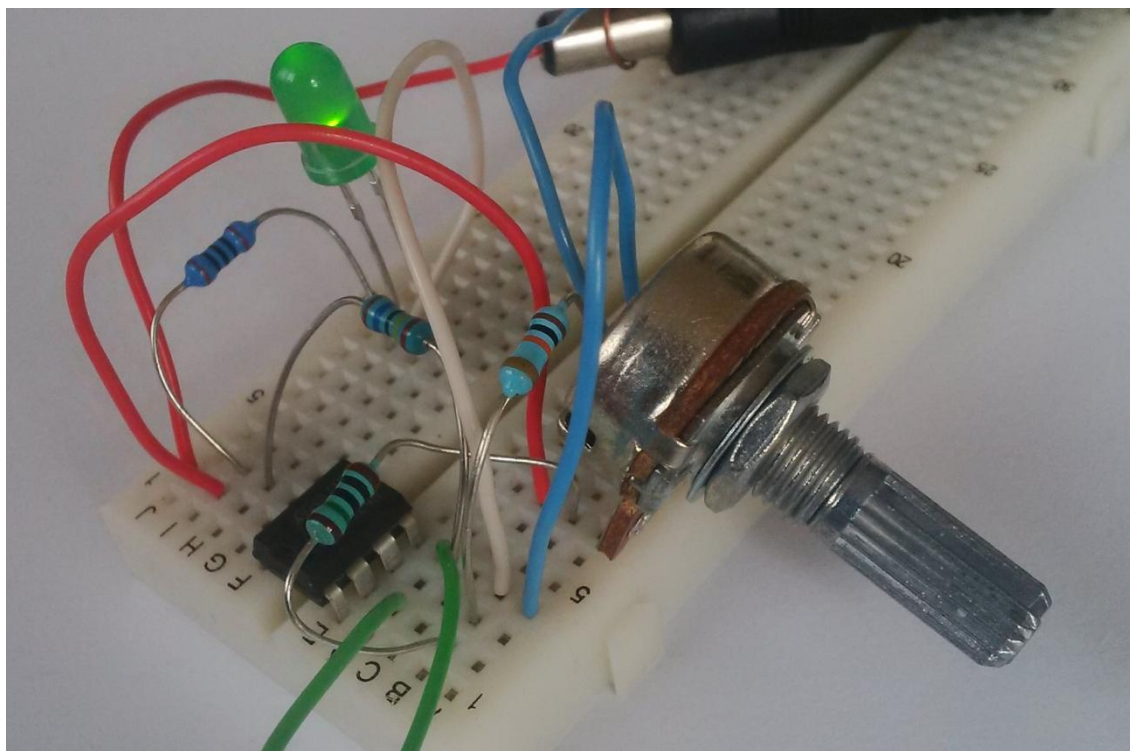
V okolí rovnosti hodnot referenčního a neznámého napětí by mohlo docházet k rezonanci výstupu operačního zesilovače. Záporná zpětná vazba tvořená rezistorem R_2 má tomuto jevu zabránit a vykonávat funkci stabilizace výstupu obvodu.

Jako optický signalizátor je na výstupu obvodu LED dioda s předřazeným odporem R_3 pro ochranu před výkyvy proudu.



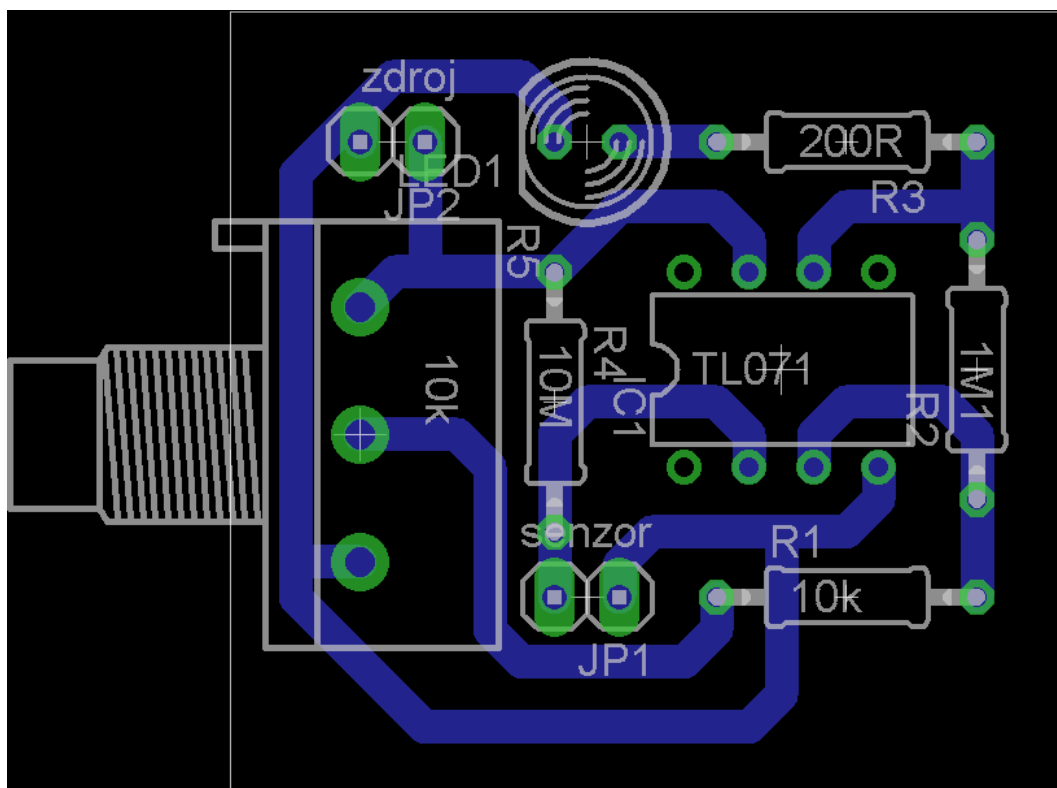
Obr 3.4: Schéma obvodu operačního zesilovače v zapojení jako komparátor

Pro ověření funkčnosti a vhodnosti obvodu k řešení problematiky byl obvod realizován na nepájivé propojovací desce, viz Obr 3.5.



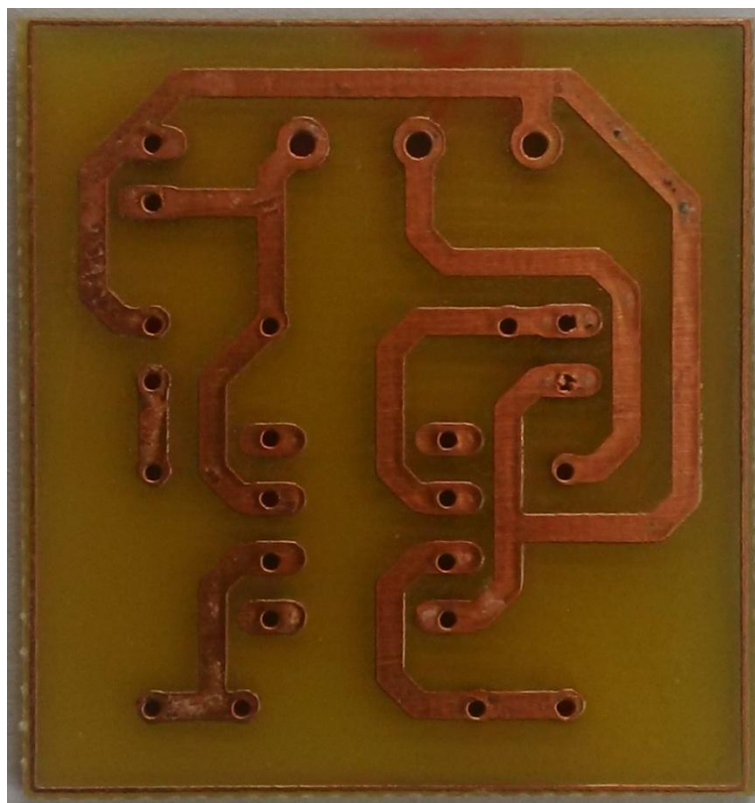
Obr 3.5: Obvod komparátoru realizovaný na nepájivém propojovacím poli

Obvod byl otestován a vyhodnocen jako vhodný pro realizaci zařízení pro posuzování vhodnosti textilií k ovládání kapacitních dotykových displejů. Dalším postupem bylo vytvořit návrh desky plošného spoje v softwaru Eagle, viz Obr 3.6.



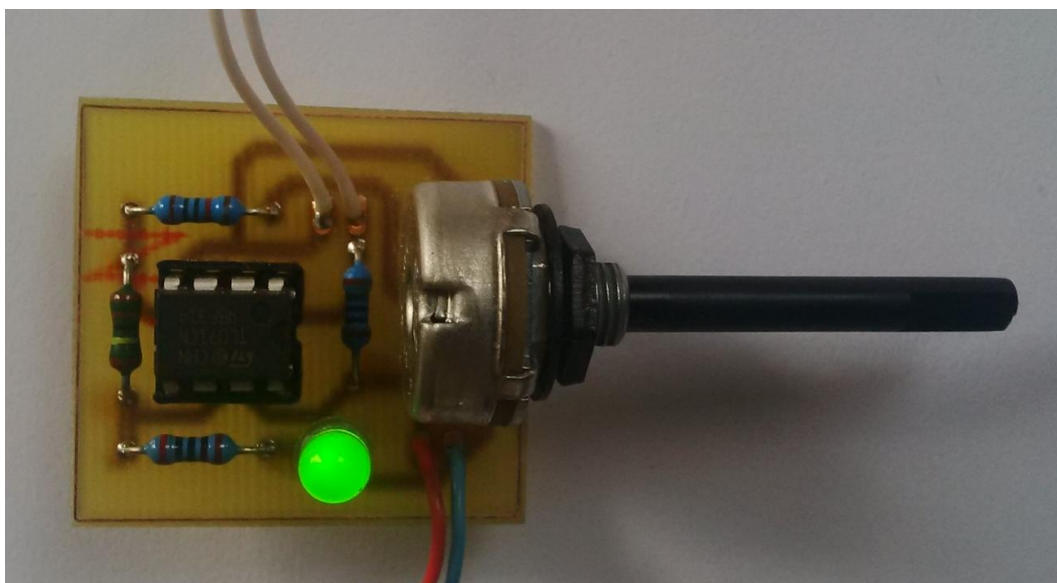
Obr 3.6: Návrh desky plošného spoje obvodu komparátoru

Po navržení desky plošného spoje následovalo zadání k realizaci. Realizace byla provedena na Fakultě mechatroniky, TUL.



Obr 3.7: Deska plošného spoje komparátoru po výrobě

Po realizaci desky plošného spoje následuje osazení součástkami a jejich připájení. V další fázi je na řadě oživení obvodu připojením na zdroj napájení a test funkčnosti, viz Obr 3.8.



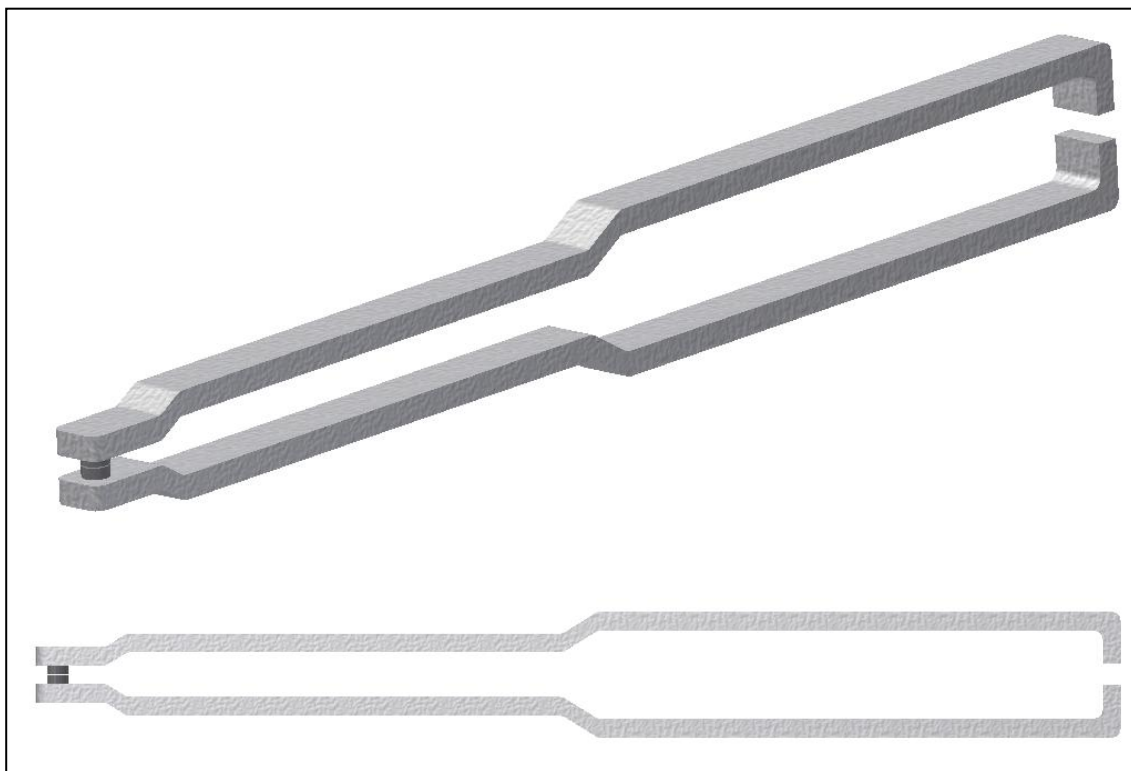
Obr 3.8: Deska plošného spoje komparátoru po osazení a oživení obvodu

seznam součástek

rezistory	1 x 10 k Ω
	1 x 200 Ω
	1 x 1,1 M Ω
	1 x 10 M Ω
	1 x 10 k Ω potenciometr lineární
LED dioda libovolné barvy	
operační zesilovač	TL071N

3.3 Návrh a realizace elektrod

Návrh elektrod a jejich mechanické části byl v první fázi zamýšlen pro použití na hotových výrobcích. Byl navrhován tak, aby se elektrody mohly zasunout do rukavice, viz Obr 3.9. Od této vize se před samotnou realizací upustilo, jelikož by nebylo možné zajistit souosost čelistí s elektrodami, což by značně ovlivňovalo přesnost měření. Dalším problémem by bylo dodržení stejného přitlaku pro různé tloušťky materiálu.



Obr 3.9: 3D model klešťových elektrod

Po zavrnutí prvního návrhu z výše popsaných důvodů bylo navrženo nové řešení v podobě ploché destičky s vodícími sloupky, které zaručují dostatečnou souosost elektrod. Přítlak vyvinutý destičkou je dán jednak její hmotností, která je snadno kontrolovatelná a nastavitelná a také velikostí plochy, na kterou působí tíhová síla destičky. Velikost plochy mohla být vyřešena jednotnou velikostí vzorků testovaného materiálu. Nakonec bylo navrženo tento problém vyřešit přidáním výstupku, který zajistil jednotnou velikost plochy, bez ohledu na velikost vzorku. Tím pádem je velikost plochy vzorku omezena pouze svou minimální hodnotou, která je rovna ploše výstupku.

Pro ověřování objemové a plošné vodivosti jsou zapotřebí dva typy elektrod.

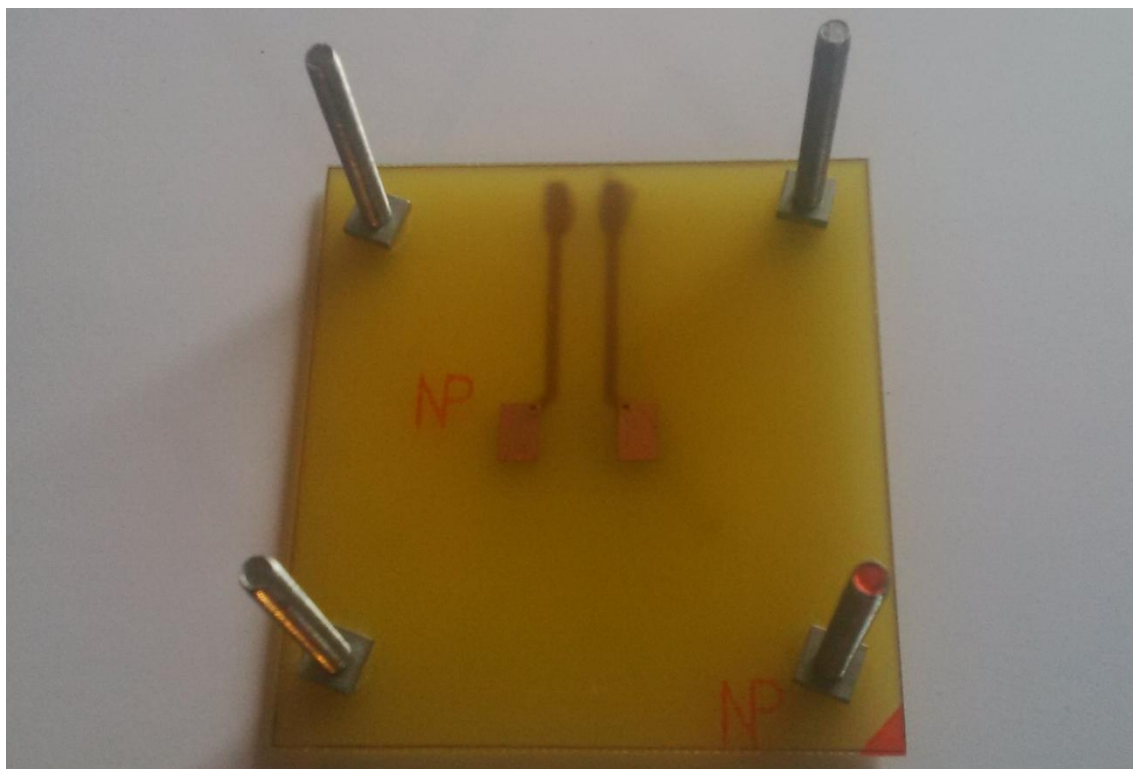
Elektroda pro měření povrchového odporu

Pro měření povrchového odporu jsou zapotřebí dvě elektrody umístěné v jedné rovině. Pro následný výpočet plošného odporu je nutné znát délku a vzdálenost elektrod. Navržené elektrody měly délku shodnou s jejich vzdáleností, čehož mohlo být s výhodou využito, pokud by byly připojeny k ohmmetru, k měření hodnoty

povrchového odporu. V takovém případě by se již hodnota v ohmech nemusela přepočítávat a byla by ekvivalentní hodnotě ohm na čtverec.

Přítlačná destička byla navržena tak, aby výstupkem z nevodivého materiálu bezpečně překrývala obě elektrody a mezeru mezi nimi.

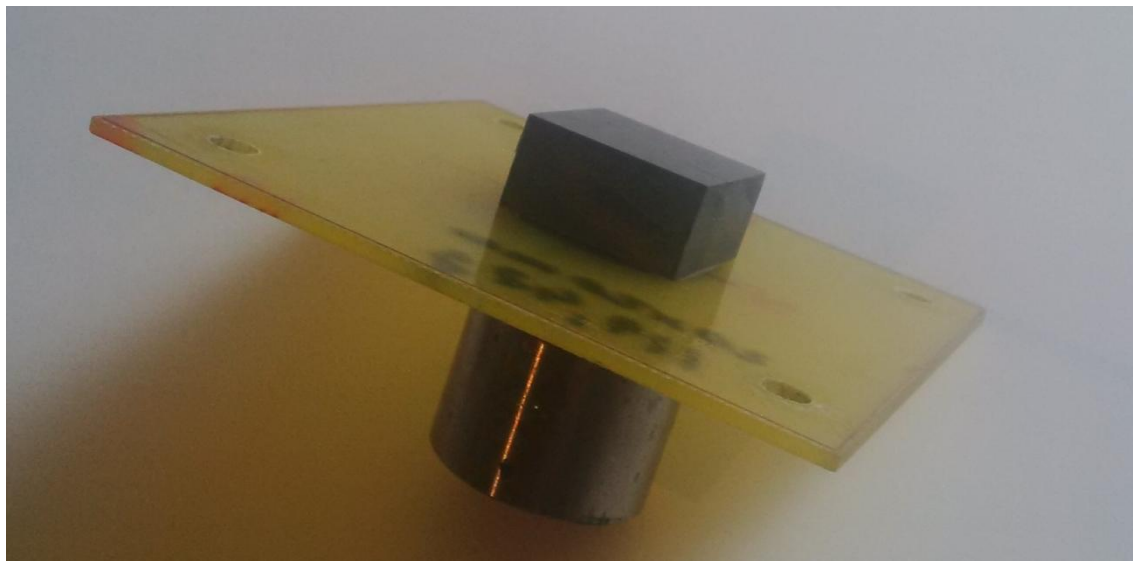
Výroba elektrod a přítlačné destičky byla zadána opět na Fakultě mechatroniky, TUL. Z technologických důvodů byla deska s elektrodami vyrobena v odlišném rozměru, než znělo zadání. Prostor mezi elektrodami nebyl čtvercový, viz Obr 3.10. To nemá vliv na samotný princip měření, ale v případě připojení ohmmetru pro získání hodnoty plošné vodivosti se musí hodnota odečtená na ohmmetru přepočítat dle vztahu (4). Dále byla destička vybavena čtyřmi vodícími sloupky, pro přesné vedení přítlačné destičky, aby přítlak působil v místě měření.



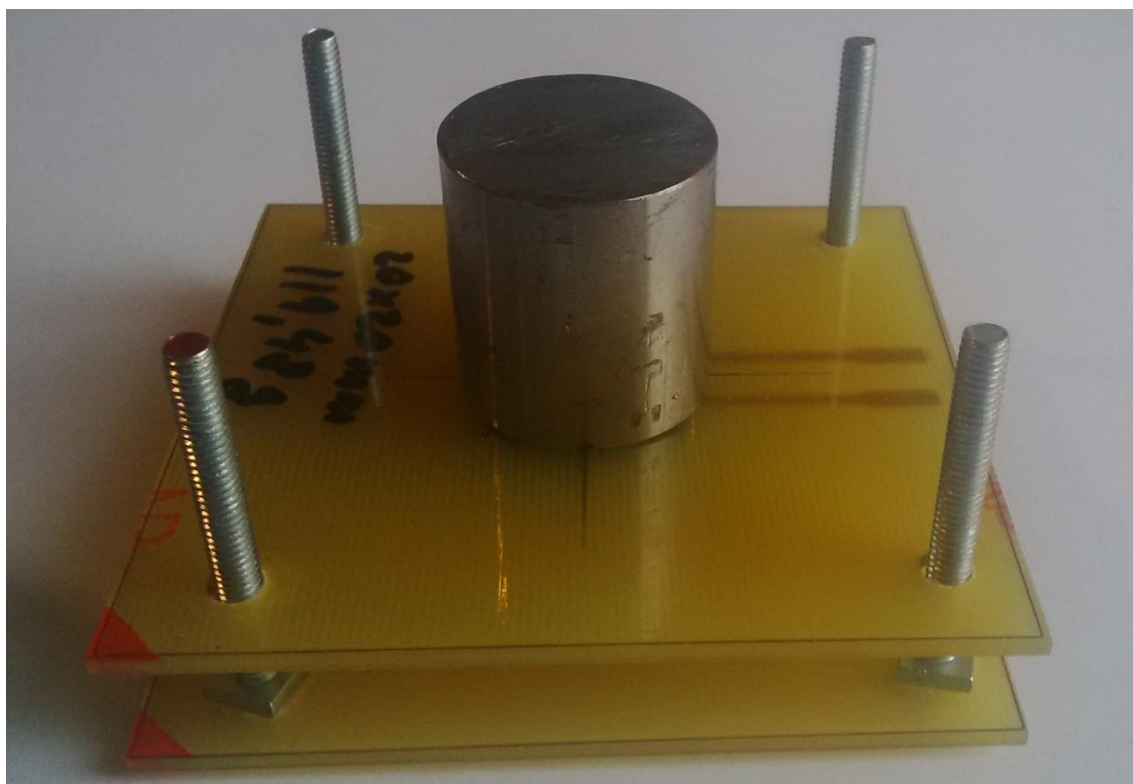
Obr 3.10: Elektrody pro měření povrchového odporu po realizaci

Úprava přítlačné destičky z CUPREXTITu, materiálu pro výrobu desek plošných spojů, dále probíhala na KNT. Na destičku byla umístěna zátěž ve tvaru kvádra z polypropylenu, realizující nevodivý přítlačný výstupek. Z opačné strany destičky bylo provedeno dovážení pomocí železného válečku, pro dosažení potřebné

tíhové síly, vyvolávající spolu s plochou výstupku potřebný přítlak na textilní materiál. Finální vzhled elektrod a přitlačné destičky je na obrázcích Obr 3.11 a Obr 3.12.



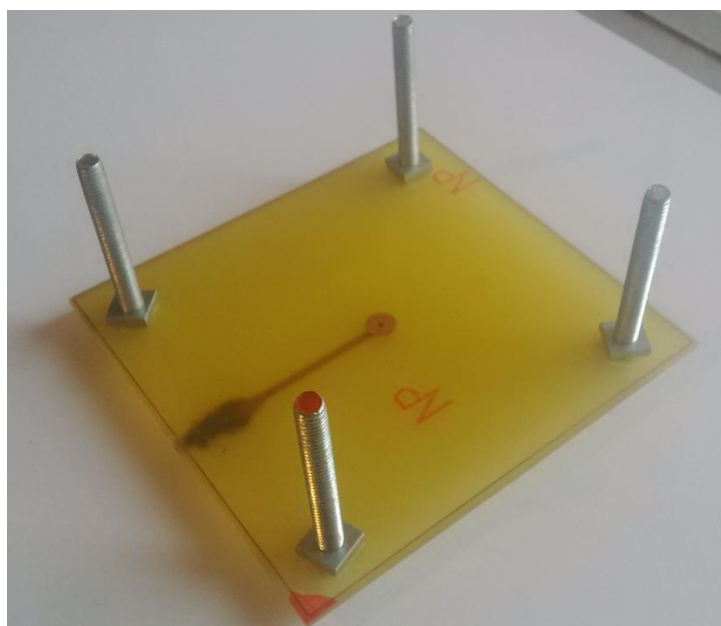
Obr 3.11: Přitlačná destička k elektrodám pro měření povrchové vodivosti



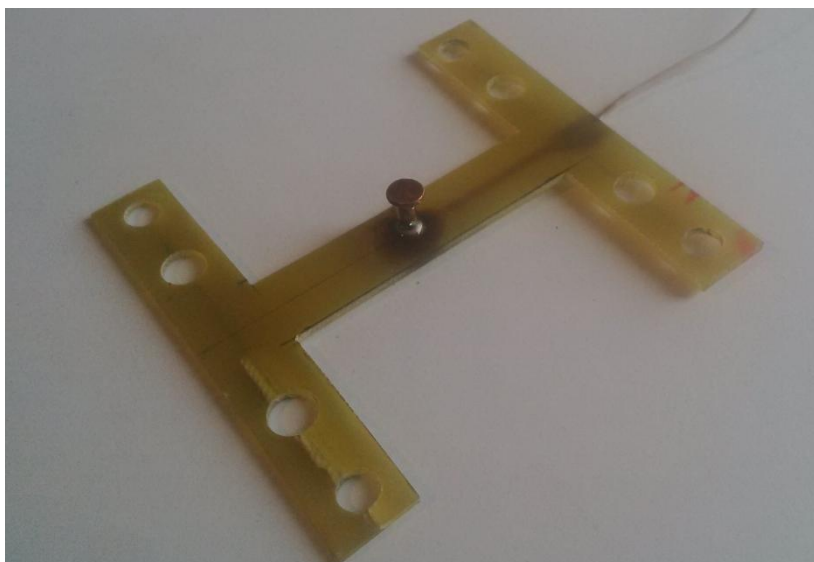
Obr 3.12: Elektrody pro měření povrchového s přitlačnou destičkou

Elektroda pro měření objemového odporu

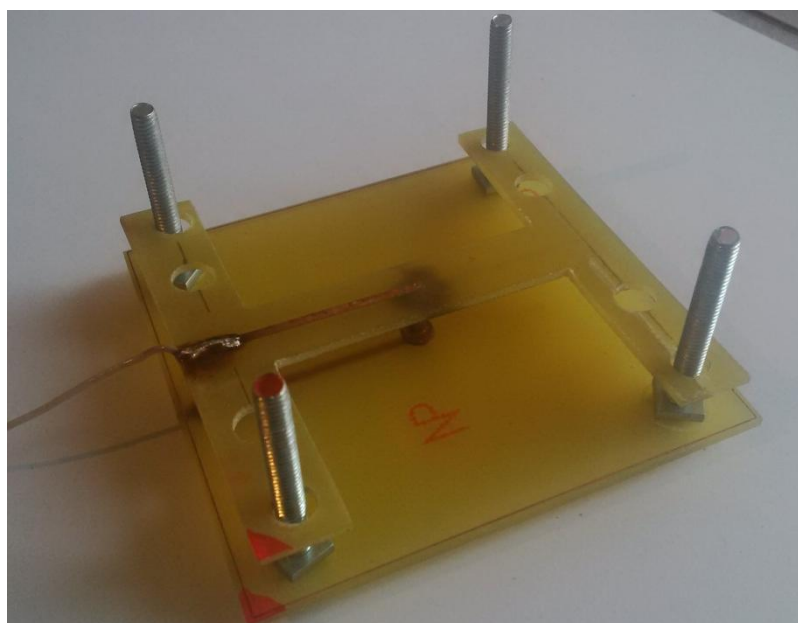
Na rozdíl od případu měření povrchového odporu je u měření objemového odporu potřeba dvou elektrod umístěných proti sobě. Plocha elektrod byla zvolena jako kruh o průměru 5 mm, jehož plocha přibližně odpovídá minimální ploše dotyku, naměřené v kapitole 2.1.2. Pevná destička s jednou elektrodou byla vybavena čtyřmi vodícími sloupky pro vedení destičky s druhou elektrodou, viz Obr 3.13. Druhá elektroda byla navržena totožně, ale nebyla vybavena vodícími sloupky. Navíc na ní byl připevněn výstupek z elektricky vodivého materiálu, který tvořil protilehlou elektrodu. Dále muselo dojít k odlehčení, jelikož tíhová síla, působící na plochu velikosti výstupku, byla příliš velká. Výsledek úprav a odlehčení pohyblivé elektrody je zřejmý z Obr 3.14. Konečný vzhled a upořádání elektrod pro měření objemového odporu je na Obr 3.15.



Obr 3.13: Elektroda pro měření objemového odporu po realizaci



Obr 3.14: Přítlačná elektroda pro měření objemového odporu po realizaci



Obr 3.15: Kompletní elektrody pro měření objemového odporu

3.4 Kompletace a finální úprava zařízení

Zařízení složené z obvodu plošného spoje a jednotlivých elektrod bylo kompletováno a složeno do plastové konstrukční krabičky. Krabička byla upravena pro vyvedení elektrod, a LED diody viz Obr 3.16 a osazena konektorem pro přivedení

napájení, viz Obr 3.17. Dále byla zkrácena hřídel potenciometru tak, aby neprocházela stěnou krabičky. Její vyvedení z krabičky k možnosti regulace nebylo v tomto případě žádoucí, protože po kalibraci obvodu již není vhodné měnit nastavení. Není vyloučeno její pozdější uživatelské zpřístupnění, pokud by bylo zařízení používáno k jinému účelu, než bylo navrženo.



Obr 3.16: Krabička s obvodem komparátoru s vyvedenou LED diodou a vývody pro připojení elektrod



Obr 3.17: Krabíčka s obvodem komparátoru – konektor pro napájení obvodu

4 Odladění a ověření funkčnosti

Pro praktické ověření byly použity vzorky různých textilních materiálů. Bylo zjišťováno, zda jsou tyto vzorky schopny ovládat mobilní zařízení a zda je přístroj schopen správně indikovat funkčnost textilie pro tento účel. Dále byly od firmy Holík International s.r.o. získány vzorky materiálů pro ověření jednotlivých vrstev materiálů, používaných pro výrobu rukavic a také přípravků pro zvýšení elektrické vodivosti vláknenných materiálů pro případnou úpravu vodivosti.

4.1 Zkoušení přípravku a odladění funkčnosti

V této části práce bylo prováděno zkoušení na různých materiálech a bylo porovnáváno vyhodnocení výsledků ze zařízení proti výsledkům ze subjektivního testování na kapacitním dotykovém displeji. Výsledky jsou zřejmé z Tab 4.1.

Materiál	Povrchová vodivost	Objemová vodivost	Subjektivní posouzení na displeji
100% Bavlněná tkanina	NOK	NOK	NOK
100% Vlněná pletenina	NOK	NOK	NOK
Pletenina 65% Polyester/35% Bavlna	NOK	NOK	OK
100% Bavlněná pletenina	NOK	NOK	NOK
100% Polyesterová tkanina	NOK	NOK	NOK
Zakoupené dotykové rukavice 1	OK	OK	OK
Zakoupené dotykové rukavice 2	OK	OK	OK

Tab 4.1: Výsledky ověřování funkčnosti

Výsledky materiálu fungujícího na displeji, ale s negativními výsledky na zařízení, jsou způsobeny příliš malou tloušťkou materiálu, při které je ještě možné displej relativně spolehlivě ovládat, ale na měřicích elektrodách nevykazují dostatečnou vodivost.

Zařízení bylo kalibrováno pomocí potenciometru, který byl nastaven na hlášení kladného výsledku pro minimální vodivost, odpovídající komerčně vyráběným dotykovým rukavicím. Po přesném odladění, by mohla být změřena hodnota odporu nastavená na potenciometru a ten by mohl být do budoucna nahrazen odporovým trimrem nebo pevným rezistorem.

4.2 Ověřování funkčnosti na vybraných materiálech používaných pro výrobu hasičských rukavic

Byly vybrány tři vzorky materiálů od firmy Holík International s.r.o., kde každý ze vzorků byl vyroben jinou technologií, viz Tab 4.2.

Materiál	Povrchová vodivost	Objemová vodivost
Hovězí štípenka 0,9 – 1,1	NOK	NOK
NT 100% Kevlar KR 102	NOK	NOK
Tkanina 85% Poroaramid	NOK	NOK

Tab 4.2: Výsledky ověřování funkčnosti měření na získaných vzorcích textilií

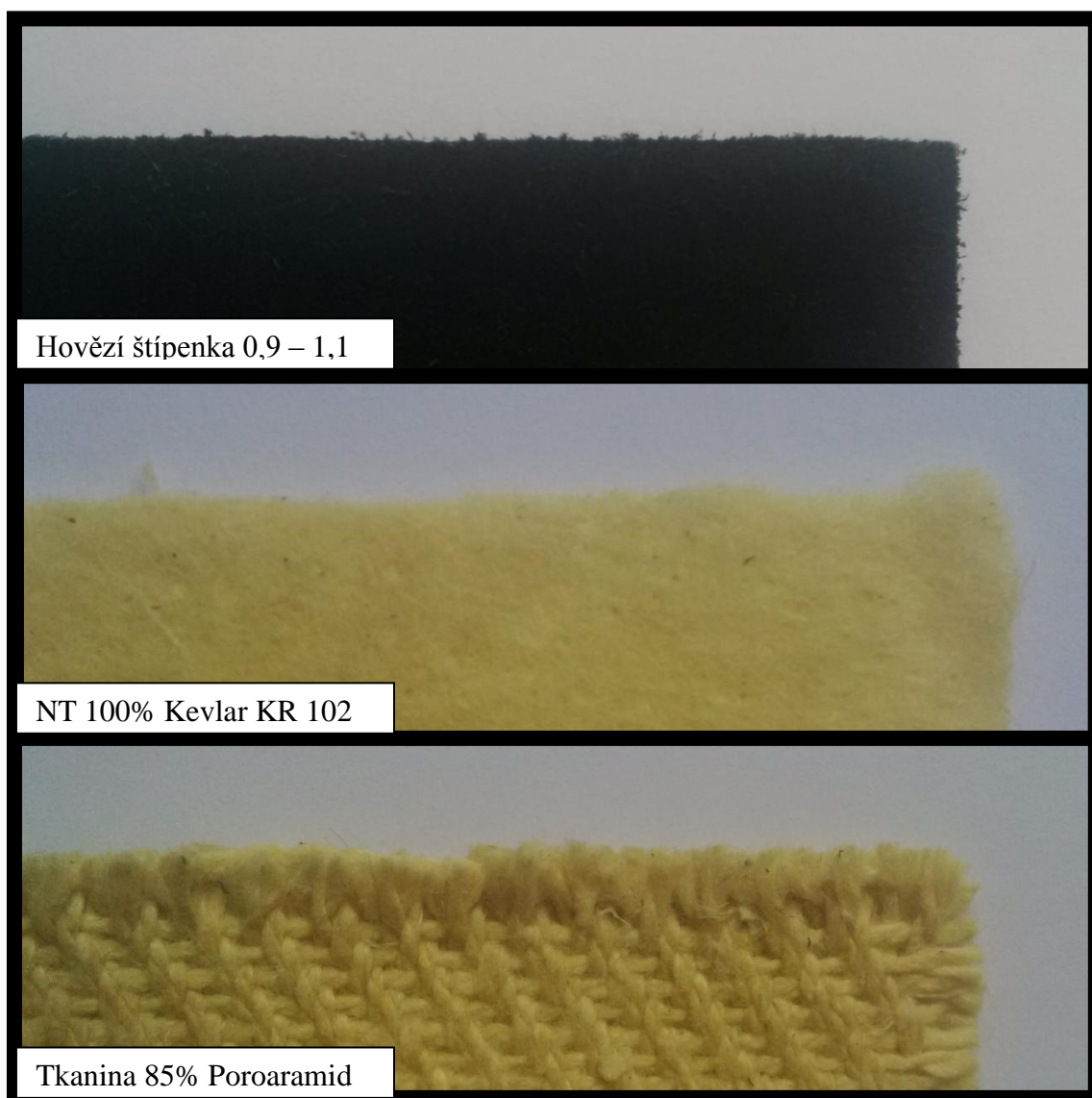
Vybrané materiály byly vyhodnoceny jako nevhodné pro použití k výrobě dotykových rukavic pro kapacitní displeje, jelikož nesplnili oba stanovené požadavky na jejich vodivost. Funkční materiál musí projít úspěšně oběma testy.

Tyto materiály bylo rozhodnuto upravit pomocí přípravku pro zvýšení elektrické vodivosti vlákněných materiálů.

4.3 Úprava elektrické vodivosti vybraných vzorků

Vzorky textilií byly rozměrově upraveny tak, aby je bylo možné vložit mezi elektrody měřicího zařízení. Dále byla zaznamenána hmotnost jednotlivých vzorků.

Následně byl připraven roztok antistatického přípravku, o němž bylo známo pouze to, že se jedná o organickou sloučeninu na bázi fosforu a doporučený postup aplikace na textilie. Doporučené ředění vodou bylo 20 g/l. Po namíchání v něm byly impregnovány vzorky textilií a po jejich vyjmutí byla odstraněna přebytečná kapalina na požadovaný odmačk 90 – 110 % hmotnosti vzorku, což bylo ověřováno vážením. Následně bylo provedeno sušení v horkovzdušné komoře při 110 °C, kde došlo k odstranění kapalné fáze.



Obr 4.1: Vzorky vybrané pro úpravu vodivosti

Výsledky měření jsou zřejmé z Tab 4.3 níže. Přípravkem na úpravu elektrické vodivosti textilií se nepodařilo dostatečně zvýšit hodnotu vodivosti vybraných vzorků, aby se staly vhodnými pro ovládání kapacitních dotykových displejů.

Materiál	Povrchová vodivost	Objemová vodivost
Hovězí štípenka 0,9 – 1,1	NOK	NOK
NT 100% Kevlar KR 102	NOK	NOK
Tkanina 85% Poroaramid	NOK	NOK

Tab 4.3: Výsledky ověřování funkčnosti měření na upravených vzorcích textilií

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vypracovat rešerši na téma ovládání zařízení prostřednictvím dotykového displeje se zaměřením na principy a technologie použité u dotykových displejů. Poté vybrat parametry textilie, které ovlivňují spolehlivé ovládání dotykového displeje. Následně provést potřebná měření, určující konkrétní hodnoty vybraných parametrů. Dalším cílem bylo navrhnout a realizovat měřící zařízení, které vyhodnocuje vhodnost textilie pro použití k ovládání dotykového displeje. V závěru poté odzkoušet funkčnost zařízení pomocí získaných a připravených vzorků.

V rešeršní části práce jsem se seznámil s technologiemi, které se používají k ovládání dotykových displejů. Kapacitní technologie je velmi omezena vlastnostmi materiálu ovládacího prvku. Po prostudování problematiky byly vybrány parametry textilie, které ovlivňují jejich použití pro ovládání kapacitních displejů. Byly to ovládací síla, ovládací plocha a z nich vypočtený tlak, maximální tloušťka nevodivého materiálu a povrchová a objemová elektrická vodivost. Následně byly navrženy jejich způsoby měření a naměřeny jejich kritické (mezní?) hodnoty. Na základě těchto hodnot bylo navrženo a realizováno měřící zařízení, které vyhodnocuje vhodnost textilie k použití pro ovládání kapacitních dotykových z hlediska elektrické vodivosti při určitém vyvinutém tlaku.

Řídící obvod zařízení se skládá z operačního zesilovače zapojeného jako komparátor. Porovnává napětí nastavené potenciometrem s napětím, jehož velikost ovlivňuje vodivost zkoušené textilie. Pokud má textilie vhodnou elektrickou vodivost, rozsvítí se LED dioda.

Dále byly navrženy elektrody, zaručující stejný přitlak bez ohledu na tloušťku a velikost vzorku. Velikost vzorku je ovlivněna pouze svou minimální hodnotou. Textilie jsou vkládány mezi elektrody, které jsou připojené k měřicímu obvodu.

Byla ověřena funkčnost navrženého zařízení. Dále byly připraveny vzorky textilií s antistatickou úpravou, která zvyšuje elektrickou vodivost.

Z výsledků je zřejmé, že navržené zařízení úspěšně sleduje hodnotu elektrické vodivosti textilie a spolehlivě posuzuje vhodnost textilie pro ovládání kapacitního dotykového displeje.

Do budoucna by bylo vhodné porovnat různé způsoby úpravy elektrické vodivosti textilií.

Literatura

- [1] YANG, Ik-seok a Oh-kyong KWON. A touch controller using differential sensing method for on-cell capacitive touch screen panel systems. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2011, vol. 57, issue 3, s. 1027-1032. DOI: 10.1109/TCE.2011.6018851. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6018851>
- [2] HWANG, Tong-Hun, Wen-Hai CUI, Ik-Seok YANG a Oh-Kyong KWON. A highly area-efficient controller for capacitive touch screen panel systems. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2010, vol. 56, issue 2, s. 1115-1122. DOI: 10.1109/TCE.2010.5506047. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5506047>
- [3] FROM APPS TO EVERYDAY SITUATIONS. In: *FROM APPS TO EVERYDAY SITUATIONS* [online]. 2011 [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: http://www.ericsson.com/res/docs/2011/silicon_valley_brochure_letter.pdf
- [4] VAUGHAN NICHOLS, Steven J. New Interfaces at the Touch of a Fingertip. *Computer*. 2007, vol. 40, issue 8, s. 12-15. DOI: 10.1109/MC.2007.286. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4292002>
- [5] BHALLA, Mudit Ratana a Anand Vardhan BHALLA. *International journal of computer applications: Comparative Study of Various Touchscreen Technologies* [online]. 9/2010 [cit. 2014-02-18]. ISSN 0975 – 8887. Dostupné z: <http://www.ijcaonline.com/volume6/number8/pxc3871433.pdf>
- [6] KIM, Ki-Duk, San-Ho BYUN, Yoon-Kyung CHOI, Jong-Hak BAEK, Hwa-Hyun CHO, Jong-Kang PARK, Hae-Yong AHN, Chang-Ju LEE, Min-Soo CHO, Joo-Hyeon LEE, Sang-Woo KIM, Hyung-Dal KWON, Yong-Yeob CHOI, Hosuk NA, Junchul PARK, Yeon-Joong SHIN, Kyungsuk JANG, Gyoocheol HWANG a Myunghee LEE. A capacitive touch controller robust to display noise for ultrathin touch screen displays. *2012 IEEE International Solid-State Circuits Conference*. IEEE, 2012, 19-23 Feb. 2012, s. 116-117. DOI: 10.1109/ISSCC.2012.6176943. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6176943>

- [7] LUO, Chenchi, Milind A. BORKAR, Arthur J. REDFERN a James H. MCCLELLAN. Compressive Sensing for Sparse Touch Detection on Capacitive Touch Screens. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. 2012, vol. 2, issue 3, s. 639-648. DOI: 10.1109/JETCAS.2012.2217033. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6303837>
- [8] KIM, H., C. M. GILMORE, A. PIQUÉ, J. S. HORWITZ, H. MATTOUSSI, H. MURATA, Z. H. KAFABI a D. B. CHRISSEY. Electrical, optical, and structural properties of indium–tin–oxide thin films for organic light-emitting devices. *Journal of Applied Physics*. 1999, vol. 86, issue 11, s. 6451-. DOI: 10.1063/1.371708. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/86/11/10.1063/1.371708>
- [9] WU, C. C., C. I. WU, J. C. STURM a A. KAHN. Surface modification of indium tin oxide by plasma treatment: An effective method to improve the efficiency, brightness, and reliability of organic light emitting devices. *Applied Physics Letters*. 1997, vol. 70, issue 11, s. 1348-. DOI: 10.1063/1.118575. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/70/11/10.1063/1.118575>
- [10] BLANKENSHIP, Tim a Tim WANG. Projected-Capacitive Touch Systems from the Controller Point of View. *Projected-Capacitive Touch Systems from the Controller Point of View*. 1/2011. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/5047>
- [11] BARRETT, Gary a Ryomei OMOTE. *Information display: Projected-Capacitive Touch Technology* [online]. 2010, roč. 2010, č. 3 [cit. 2014-02-18]. ISSN ISSN 0362-0972. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph250/lee2/docs/art6.pdf>
- [12] LUO, Chenchi, James MCCLELLAN, Milind BORKAR a Arthur REDFERN. Sparse touch sensing for capacitive touch screens. *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2012, s. 2545-2548. DOI: 10.1109/ICASSP.2012.6288435. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6288435>
- [13] Blackbox-av. *Blackbox-av* [online]. [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: <http://www.blackboxav.co.uk/wp-content/uploads/2013/07/Museum-touch-screens-Infrared.jpg>

- [14] Touchscreenmagazine.nl. *Touchscreenmagazine.nl* [online]. [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: <http://www.http://www.touchscreenmagazine.nl/wp-content/uploads/2009/11/SAW.jpg/wp-content/uploads/2009/11/SAW.jpg>
- [15] LÁSKA, Jan a Jan POSEJPAL. Mobilmania.cz. *Mobilmania.cz* [online]. 2009 [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: <http://www.mobilmania.cz/clanky/rezistivni-nebo-kapacitni-displej-rim-spoji-vyhody-obou/sc-3-a-1123060/default.aspx>
- [16] Miobilnet.cz. VEJTASA, Petr. *Mobilnet.cz* [online]. 2012 [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: <http://mobilenet.cz/clanky/sony-xperia-sola-novy-bezdotykovy-displej-pod-drobnohledem-8816>
- [17] Svět Androida. DOLEJŠ, Jan. *Svět Androida* [online]. 2013 [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: <http://www.svetandroida.cz/par-rad-jak-ovladnout-androida-v-zime-a-neumrznout-201302>
- [18] VEKOB. *VEKOB* [online]. [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: http://www.vekobs.cz/cz_technologie.htm
- [19] BAE, J. a K. H. HONG. Electrical properties of conductive fabrics for operating capacitive touch screen displays. *Textile Research Journal*. 2013-02-15, vol. 83, issue 4, s. 329-336. DOI: 10.1177/0040517512464298. Dostupné z: <http://trj.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0040517512464298>
- [20] Sheet Resistance. *Sheet Resistance* [online]. [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/vc/theory/sheetRes.html>
- [21] Sheet resistance. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Sheet_resistance
- [22] DENG, Hua, Lin LIN, Mizhi JI, Shuangmei ZHANG, Mingbo YANG a Qiang FU. Progress on the morphological control of conductive network in conductive polymer composites and the use as electroactive multifunctional materials. *Progress in Polymer Science*. 2014, vol. 39, issue 4, s. 627-655. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.07.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670013000877>
- [23] Vodivý polymer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 20.3.2013 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vodiv%C3%BD_polymer
- [24] ERT 30.5-99. *EDANA Test Method 30.5-99: Thickness*. 2012.

- [25] VH. *Praktická elektronika - Amatérské radio: Senzorový spínač žárovky*. Praha: Amaro, 1996, č. 8. ISSN ISSN: 1804-7173.
- [26] GES electronics. *GES electronics* [online]. 1993 [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/b/buk455-60.pdf>
- [27] Outech Havířov. *Outech Havířov* [online]. [cit. 2014-02-18]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ea/oz.pdf

Seznam příloh

Obsah DVD – ROM

